INERS' 24

5. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMALARI SEMPOZYUMU

7-9 MART/MARCH 2024

5th INTERNATIONAL ENGINEERING RESEARCH SYMPOSIUM

Düzce Universty / Düzce –TÜRKİYE

SEMPOZYUM TAM METİN KİTABI

SYMPOSIUM FULL TEXT BOOK



DÜZCE UNIVERSITY

INERS
International Engineering
Research Symposium

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

5th International Engineering Research Symposium

Proceeding Book

March 7-9, 2024
Düzce, Türkiye

ISBN
978-625-6330-05-4

ISBN: 978-625-6330-05-4

Preface

5th International Engineering Research Symposium was held between 7-9 March 2024 with the hosting of Düzce University, Türkiye. Over 150 full-text papers and abstracts were submitted in 15 various engineering branches to the symposium. Approximately 130 of these papers were accepted for the presentation after the peer-reviews.

Thank you for your interest to the symposium.

INERS'24 Organization Committee

ISBN: 978-625-6330-05-4

Committees

HONOR COMMITTEE

Prof. Dr. Nedim Sözbir	Rector of Düzce University
Prof. Dr. İlhan Genç	Vice Rector of Düzce University
Prof. Dr. Ali Öztürk	Vice Rector of Düzce University
Prof. Dr. Serkan Torun	Vice Rector of Düzce University

ORGANIZATION COMMITTEE

Dr. Resul Kara (Chair of the symposium)	Düzce University
Dr. Ali Etem Gürel (Co-Chair of the symposium)	Düzce University
Dr. Yunus Biçen	Düzce University
Dr. Ümit Yurt	Bolu Abant İzzet Baysal University
Dr. Ümit Ağbulut	Yılz Teknik University
Dr. Filiz Dursun	Düzce University
Dr. Gökhan Yıldız	Düzce University
Dr. Zafer Cingiz	Düzce University
Dr. Alper Ergün	Karabük University
Dr. Enver Küçükkülahlı	Düzce University
Dr. Hüseyin Bakır	Doğuş University
Dr. Seymen Çiftçi	Duzce Üniversity
Dr. Petr Vozka	California State University, Los Angeles

SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Dr. Elif ÖĞÜT	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Faruk ARAS	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya KIRKICI	University of South Alabama
Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İlyas UYGUR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Hamit SARUHAN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Suat SARIDEMİR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Turgay KIVAK	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Nuri ŞEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Fikret POLAT	Düzce Üniversitesi

ISBN: 978-625-6330-05-4

Doç. Dr. Mustafa AYYILDIZ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Fuat KARA	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Murat BULUT	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ömer ERKAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Akif KETEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Engin NAS	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail KOYUNCU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Menderes KAM	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Murat AYAZ	Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ	Karabük Üniversitesi
Doç. Dr. Sait Eser KARLIK	Bursa Uludağ Üniversitesi
Doç. Dr. Sıtkı AKINCIOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Volkan KIRMACI	Bartın Üniversitesi
Doç. Dr. Abid USTAOĞLU	Bartın Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf ÇAY	Sakarya Uygulamalı Bilimler Universitesi
Doç. Dr. Murat KARABACAK	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Doç. Dr. Cüneyt UYSAL	Karabük Üniversitesi
Doç. Dr. Benjamin DURAKOVIC	International University of Sarajevo
Prof. Dr. Deepenraj BALAKRISHNAN	Prince Mohammad Bin Fahd University
Prof. Dr. A. Abu SIADA	Curtin University
Prof. Dr. Hitesh PANCHAL	Government Engineering College
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÇİLLİYÜZ	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Prof. Dr. Laveet KUMAR	Mehran University of Engineering and Technology
Prof. Dr. Erdem CÜCE	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DUMAN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Prof. Dr. Murat KALE	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet UÇAR	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Şenol ŞİRİN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Tarık GEDİK	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet BUDAKÇI	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal POLAT	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Doç. Dr. Kenan DÖŞOĞLU	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yaşar ŞEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Melike ERDOĞAN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Mert YILDIRIM	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Salih TOSUN	Düzce Üniversitesi

ISBN: 978-625-6330-05-4

Prof. Dr. Anh Tuan Hoang	Dong A University
Prof. Dr. Tikendra Nath Verma	Maulana Azad National Institute of Technology Bhopal
Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Günnur KOÇAR	Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Gaurav Saini	Harcourt Butler Technical University
Prof. Dr. Rabah GOMRI	Constantine University
Prof. Dr. Audrius Senulis	Klaipeda University
Prof. Dr. Mehdi Seifbarghy	Alzahra University
Doç. Dr. Yusuf ALTUN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Fatih TAŞPINAR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Barış KANTOĞLU	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tuğba GÜRER	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Münir UÇAK	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fadime ÖĞÜLMÜŞ DEMİRCAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tuncay KAP	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Celal APAY	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KORKMAZ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Ali ÇALHAN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Behçet DÜNDAR	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU	Sakarya Üniversitesi
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Murat TOPAÇ	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Adnan SÖZEN	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Issouf FOFANA	Université du Québec à Chicoutimi
Prof. Dr. Ethem TOKLU	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DURSUN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İrem DÜZDAR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Şeref KESKİN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Emine MALKOÇ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Filiz BİRBİR ÜNAL	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Serkan SUBAŞI	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Talha KABAKUŞ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Zehra BOZKURT	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Gürcan SAMTAŞ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK	Düzce Üniversitesi

ISBN: 978-625-6330-05-4

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİRYÜREK	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Emin YILDIRIZ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer ÜLGÜDÜR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İkrime ORKAN UÇAR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emrah YILMAZ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ALBAYRAK	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Kim Tiow Ooi Kim Tiow Ooi	Nanyang Technological University
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Cihan	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Elif ÖĞÜT	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Faruk ARAS	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya KIRKICI	University of South Alabama
Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İlyas UYGUR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Hamit SARUHAN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Suat SARIDEMİR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Turgay KIVAK	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Nuri ŞEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Fikret POLAT	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa AYYILDIZ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Fuat KARA	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Murat BULUT	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ömer ERKAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Akif KETEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Engin NAS	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail KOYUNCU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Menderes KAM	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Murat AYAZ	Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ	Karabük Üniversitesi
Doç. Dr. Sait Eser KARLIK	Bursa Uludağ Üniversitesi
Doç. Dr. Sıtkı AKINCIOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Volkan KIRMACI	Bartın Üniversitesi
Doç. Dr. Abid USTAOĞLU	Bartın Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf ÇAY	Sakarya Uygulamalı Bilimler Universitesi
Doç. Dr. Murat KARABACAK	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Doç. Dr. Cüneyt UYSAL	Karabük Üniversitesi
Doç. Dr. Benjamin DURAKOVIC	International University of Sarajevo

ISBN: 978-625-6330-05-4

Prof. Dr. Deepenraj BALAKRISHNAN	Prince Mohammad Bin Fahd University
Prof. Dr. A. Abu SIADA	Curtin University
Prof. Dr. Hitesh PANCHAL	Government Engineering College
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÇİLLİYÜZ	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Prof. Dr. Laveet KUMAR	Mehran University of Engineering and Technology
Prof. Dr. Erdem CÜCE	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DUMAN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Prof. Dr. Murat KALE	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet UÇAR	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Şenol ŞİRİN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Tarık GEDİK	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet BUDAKÇI	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal POLAT	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Doç. Dr. Kenan DÖŞOĞLU	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yaşar ŞEN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Melike ERDOĞAN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Mert YILDIRIM	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Salih TOSUN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Anh Tuan Hoang	Dong A University
Prof. Dr. Tikendra Nath Verma	Maulana Azad National Institute of Technology Bhopal
Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Günnur KOÇAR	Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Gaurav Saini	Harcourt Butler Technical University
Prof. Dr. Rabah GOMRI	Constantine University
Prof. Dr. Audrius Senulis	Klaipeda University
Prof. Dr. Mehdi Seifbarghy	Alzahra University
Doç. Dr. Yusuf ALTUN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Fatih TAŞPINAR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Barış KANTOĞLU	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tuğba GÜRER	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Münir UÇAK	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fadime ÖĞÜLMÜŞ DEMİRCAN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tuncay KAP	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Celal APAY	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KORKMAZ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Ali ÇALHAN	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Behçet DÜNDAR	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

ISBN: 978-625-6330-05-4

Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU	Sakarya Üniversitesi
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Murat TOPAÇ	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Adnan SÖZEN	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Issouf FOFANA	Université du Québec à Chicoutimi
Prof. Dr. Ethem TOKLU	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DURSUN	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İrem DÜZDAR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Şeref KESKİN	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Emine MALKOÇ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Filiz BİRBİR ÜNAL	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Serkan SUBAŞI	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Talha KABAKUŞ	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Zehra BOZKURT	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Gürcan SAMTAŞ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİRYÜREK	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Emin YILDIRIZ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer ÜLGÜDÜR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İkrime ORKAN UÇAR	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emrah YILMAZ	Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ALBAYRAK	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Kim Tiow Ooi Kim Tiow Ooi	Nanyang Technological University
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Cihan	Düzce Üniversitesi

ISBN: 978-625-6330-05-4

Editors

Dr. Ali Etem Gürel
Dr. Enver Küçükkülahlı
Dr. Alper Ergün

ISBN

978-625-6330-05-4

Düzce, Türkiye

ISBN: 978-625-6330-05-4

ISBN: 978-625-6330-05-4

Contents

Preface	ii
Committees	iii
Editors	ix
Dağıtım Transformatörlerinin Gücünün Belirlenmesinde Kullanılan Kişi Başına Düşen Gücün İncelenmesi	1
Bisiklet Endüstrisinde Şasi İmalatında Magnezyum Kullanımının Yapısal Analizi	7
Aynı Binada Kolonların Farklı Yerleştirilmesi Durumunda Binada Oluşan Düzensizlikler ve Moment Etkilerinin İncelenmesi	15
3 Boyutlu Yazıcılarda Topoloji ve Kafes Optimizasyonu ile Bölgesel Yoğunluk Özelleştirme Çalışması	26
Aynı Binada Kolonların Farklı Yerleştirilmesinin Yapı Maliyetine Etkisi	40
Beyin Tümörü Tespiti İçin Beyin MRI Görüntülerinin Derin Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Analiz Edilmesi	49
Otonom Mobil Robotlar İçin Metasezgisel Yöntemler Kullanılarak Yol Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi Ve Performanslarının Karşılaştırılması	55
Prefabrik Bir Sanayi Yapısının Deprem Etkisindeki Performansı ve İyileştirme Önerileri	66
Parkinson Hastalığı El Titremesi Analizi	76
Karşıt Akışlı Bir Isı Değiştiricide Farklı Hava Debilerinin Çıkış Hava Sıcaklığına Etkisi	85
Ortorombik Kristal Yapıya Sahip Tek Katmanlı FeB Malzemenin Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliğinin DFT Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi	92
High Resolution In-Shoe Plantar Pressure Measurement System: Smart Insoles	101
Otomotiv Yan Sanayiinde Tedarik Zinciri Yönetimi Ulaştırma Modeli Optimizasyonu Araç Rotalama Problemi	111
Kolonların Farklı Yerleştirilmesiyle Oluşturulan Bina Modellerinde Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanların İncelenmesi	119
Parametric Evaluation of Slip Models for Reinforced Concrete Columns with Smooth Bars	128
Naive Bayes Kullanılarak Elektrikli Araç Menzil Tahminlemesi	137
TBF Çeliğinin Hot Stamping Yöntemi ile Üretimi: İzotermal Tutma ve Mikroyapısal Karakterizasyon	143
Savaş Gemisi Filosu Atama Optimizasyonu	150
Betonarme Kolonlarda Hasar Tespit Performansının Sentetik Veriler ve Makine Öğrenmesi Kullanılarak Değerlendirilmesi	157
Borik Asit, Aktif Karbon, Atık Pirinç Kabuğu ve Lastik Tozları İçeren Poliüretan Köpüklerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi	166
Moment Çerçeve Çelik Bir Yapının Geleneksel Yöntemlerle ve Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör Sistemiyle İnşasının Maliyet Açısından Karşılaştırılması	172
Sinop İli Koşullarinda Güneş Enerjisiyle Tarimsal Sulama ve Aydinlatma Sisteminin Tasarimi Ve Deneysel Analizi	183
Sıcak Haddeleme Prosesinde Hadde Giriş Sıcaklığının Enerji Tüketimine ve Yakıt Maliyetine Etkisi	195

ISBN: 978-625-6330-05-4

Rhamnolipid: Kıyısal Alanlardaki Mikroplastiklerin Biyoremidasyonu İçin Yeni Bir Yaklaşım 201
Sabit Mıknatıslı Senkron Motor İçin Sensörsüz Vektör Kontrollü Sürücü Tasarımı ve Kontrolcü Parametrelerinin Motor Faz Akım Harmoniğine Etkisi 208
Yüksek Sıcaklık-Yüksek Çevrim Yorulma Test Cihazı Tasarımı 220
Sektörde Güneş Enerji Santralleri Kurulum Analizleri 225
Yatak boşluğu, Yağ Sınıfı ve Sıcaklığının Motor Kaymalı Yataklarında Minimum Yağ Film Kalınlığı (MYFK) ve Sürtünme Güç Kaybı Üzerine Etkisinin Sayısal Simülasyonu 246
Trafik Sayımı Lokasyon Problemi İçin Ayrıt ve Düğüm Bazlı Modeller 260
Yüksek Sıcaklıkta Nitrürleme İşlemi ile Dubleks Paslanmaz Çeliklerde Östenitik Dönüşüm 265
Türkiye'de Avcilik Mevzuati ve Av Kabahatleri 271
Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Köpük Üretim Süreçleri ve Endüstriyel Uygulamalari 279
Tasarım Yönteminin Dairesel Kesitli Salyangoza Sahip Bir Pompanın Performansına Etkilerinin İncelenmesi 290
Yapay Zekâ Destekli Multiple Skleroz (MS) Hastalığı Teşhisi 300
Uyuşukluk Belirleme Sistemleri 306
Tekstil Arşimet Spiral Anten Tasarımı 313
Uzun Mesafe İletimi İçin En Uygun Yöntemin Belirlenmesi: Hibrit WDM PON ve QAM-OFDM PON Tekniklerinin Uygulanması 319
Endüstriyel Yapılarda Betonarme Panel ve Sandviç Panel Kullanımının Araştırılması 326
Elektrikli Kargo Bisiklet Tasarımı 337
Epileptic Seizure Classification Using Local Binary Patterns and Convolutional Neural Networks from EEG Signals 342
Derin Öğrenme Kullanılarak Yangına Maruz Kalmış Betonarme Kolonlarda Yapısal Hasar Tespiti: İvme Verileri ile Bir Çalışma 348
3D CAD Programlarında Parametrik Tasarım Metodolojisinin Belirlenmesi 357
Tekstil Klima Santrallerinin Hava Yıkama Hücrelerinde Kullanılan Damla Tutucunun Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi ve Düşük Basınç Kaybına Sahip Damla Tutucu Tasarımı 365
Microstructural Investigation of MAG Welded X120Mn12 Steel Joints 380
Isıl Vakum Test Sistemi Operasyonu ve Gaz Salınımı 385
Mikromobilite ve Elektrikli Bisikletlerde Kullanılan Elektrik Motor Topolojilerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi 391
Ekotoksisite Testlerinin Son Noktasını Belirlemede Alternatif Matematiksel Yaklaşım 397
Teker İçi Motorlu Elektrikli Araçların Farklı Süspansiyon Modellerinin İncelenmesi, Yol Tutuş ve Konfor Açısından Karşılaştırılması 403
Microscopical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded 430 Stainless Steel 414
Dubleks Paslanmaz Çelikte Sigma ve Chi Fazlarının Mikroyapısal Karakterizasyonu 423
AL7075 T6 Alaşiminin Çevresel Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin Araştirilmasi 429
Camilerde Rüzgar Kulesi İle Doğal Havalandırmanın Sayısal Analizi 438
Kabin Tipi Tam Otomasyon Boya Temizleme Makinesi Tasarımı ve Üretimi 446

ISBN: 978-625-6330-05-4

Düzce Üniversitesi Kampüs İçi Atık Toplama Merkezinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Yer Seçimi 455
Farklı Proteolitik Enzimlerle Hidrolize Edilen Kazeinin Tulum Peyniri Üretiminde Kullanılması 464
Arduino Nano ile Akıllı Tekerlekli Sandalye Sistemi 469
Altı Farklı Makine Öğrenmesi Algoritması Kullanarak Akciğer Kanserinin Tahmin Edilmesi 476
Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama Tabanlı Fiber Üzerinden Radyo Haberleşmesinde İkili Faz Kaydırmalı Modülasyon Tekniğinin Performans Analizi 481
Kompozit üretiminde değişken plaka kalınlığının nedenleri ve eğilme özelliklerine etkisi 492
Elektrikli Araç Kablosuz Şarj Sistemleri İçin Kartezyen Robot Tasarımı 500
Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin Aralık Değerli Tip-2 Bulanık PID Yöntemi ile MGNİ Denetimi 513
Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçları İçin Veriye Dayalı Kontrol 523
Farklı Çekme Test Numune Boyutlarının Çekme Test Sonuçlarına Etkisinin İncelenmesi 532
Farklı Evrişimli Sinir Ağı Mimarilerinin İkili Görüntüler Üzerindeki Sınıflandırma Performansının İncelenmesi 542
Çelik Hasir İçin Üretilen Soğuk Haddeleme İşlemi Uygulanarak İnceltilip Nervürlendirilmiş Çubuklarin Teorik Ve Mekanik Analizi 551
Betonarme Konut Binalarında Sismik İzolatör Kullanımının Yapı Güvenliği Açısından İncelenmesi 569
Çeşitli Atık ve Artık Materyallerden Piroliz Yağı Eldesi ve Çalışma Koşullarının İncelenmesi 579
Hassas Tarım Uygulamalarının İnsansız Hava Aracı Kullanılarak İncelenmesi 589
Dynamic Analysis of Surface Sloshing of Open Irrigation Channels under Earthquake Effects 598
Yüksek Basınçlı Alüminyum Dökümde Magmasoft Yazılımıyla Sıkıştırma Pimlerinin Alüminyum Parça Üzerindeki Etkisi 606
Elektrikli Otobüs Şarj İstasyonları için Ekonomik Enerji Yönetim Modeli: DC Şarj Üniteleri ve Yenilenebilir Enerji Sisteminin Değerlendirilmesi 614
Yüksek Enerjili Fırınlarda Kullanılan Yakıt Türlerinin Swot Analizi İle Seçimi 622
YouTube Trend Video Büyük Veriseti Üzerinde Videoların Son Gün İzlenme Sayılarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Tahmini 629
Yüksek Basınçlı Alüminyum Dökümünde Vakum Uygulamasının Parça Üzerindeki Optimizasyonu 636
Elektroforming ile Gümüş Katkılı Saf Demirden Biobozunur Stent Malzemesi Üretimi 645

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Dağıtım Transformatörlerinin Gücünün Belirlenmesinde Kullanılan Kişi Başına Düşen Gücün İncelenmesi

Zeki Baloğlu[a], Celal Yaşar[b]*

[a]Enerjisa İstanbul Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım A.Ş. , İstanbul/Türkiye.
[b]Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** zeki.baloglu@ayedas.com.tr

ÖZET

Elektrik dağıtım projeleri hazırlanırken, alçak gerilim ve orta gerilim ekipmanları ile bölgeyi besleyecek olan transformatörün gücünü hesaplamak için, transformatör bölgesinin yükünün doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir. Eğer bölgeye ait elektriksel yük tahmini doğru yapılamazsa, bu durumda kurulan dağıtım tesisinin aşırı yüke maruz kalması sonucu, aşırı ısınmaların ve bundan kaynaklı arızaların oluşması, kayıpların artması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Ya da seçilen transformatör gücünün çok yüksek belirlenmesine karşılık çalışırken çok düşük yükle karşılaşması nedeniyle aşırı gerilim yükselmelerine, gereksiz (atıl) veya zamansız yatırımların yapılması gibi bir sorunla karşılaşılabilir. Güç yoğunluğu hesabının temel bileşenleri olarak transformatör bölgesindeki nüfus sayısı, kişi başına alınacak olan *Watt* (*W*) olarak güç değeri ve bölgeye ait dağıtım hattı uzunlukları şeklinde belirtilebilir. Transformatör bölgesindeki nüfus sayısı ve hat uzunlukları verilerine ulaşmak kolay iken, kişi başına alınacak olan *Watt* olarak güç değerinin ne alınması gerektiğine dair hesaplanmış veya belirlenmiş standart net bir değer bulunmamaktadır. Gelişen teknoloji ve her geçen gün artan elektrik kullanımı ile birlikte kişi başına kullanılan bu güç değerini belirleyebilmek için bu çalışmada İstanbul' da üç farklı yerleşim bölgesi seçilmiştir. Seçilen bölgelerde belirli periyotlarla yapılan ölçümlere dayalı olarak elde edilen değerlerden kişi başına ortalama güç hesapları yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç *yoğunluğu, kişi başına düşen güç, eşzamanlı güç faktörü, dağıtım trafosu*

Examination of the Power Per Capita Used in Determining the Power of Distribution Transformers

ABSTRACT

While preparing electricity distribution projects, the load of the transformer region must be determined accurately in order to calculate the power of the transformer that will feed the region with low voltage and medium voltage equipment. If the estimation of the electrical load for the region is not done accurately, problems such as excessive heating, resulting faults, and increased losses may occur due to the distribution facility being exposed to excessive load. On the contrary, if the selected transformer power is determined to be too high but encounters very low load during operation, issues such as excessive voltage rise and unnecessary or untimely investments may arise. The fundamental components of the power density calculation can be specified as the population in the transformer area, the power value in Watts (*W*) to be taken per capita and the distribution line lengths of the region. Although it is easy to access data on the population and line lengths in the transformer area, there is no clearly calculated or determined standard value regarding the power value in Watts to be received per capita. Three different residential areas in Istanbul were selected in this study to determine the power value used per capita with developing technology and increasing electricity usage day by day. Average power per capita was calculated from the values obtained based on measurements made in selected regions and the results were discussed.

Keywords: *Power density, power per capita, concurrently power factor, distribution transformer*

I.GİRİŞ

Elektrik enerjisi, kullanılmaya başlandığı yıllardan günümüze kadar kullanımı sürekli artan ve geliştirilen yeni teknolojiler sayesinde daha da artacağı beklenen bir enerji türüdür. Günümüzde elektrik enerjisi kullanımı insanlık için neredeyse beslenme gibi temel ihtiyaçlar seviyesine geldiğinden, artık vazgeçilmezler arasında yer almaktadır. Bu nedenle elektrik dağıtım şebekesi, elektrik enerjisinin meskenlere kadar ulaşmasını sağladığı için insanların yaşam alanlarına doğrudan etki etmektedir. Dolayısıyla ihtiyaçların doğru şekilde belirlenmesi ve belirlenen ihtiyaçlara göre elektrik dağıtım şebekesinin tasarımının yapılması önem arz etmektedir.

Elektrik dağıtım şebekesinden beslenecek yapıların güçleri hesaplanırken; öncelikle Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'ndeki standartlara göre kullanılacak ekipmanların kurulu güçleri belirlenir. Belirlenen kurulu güçlere yine ilgili yönetmelikte belirtilen eş zamanlılık katsayıları uygulanarak enerjilendirilecek yapının eş zamanlı talep gücü bulunur. Elektrik dağıtım şebekesinin gücü de besleme bölgesinde bulunan bu tür yapılar için hesaplanan eş zamanlı talep güçlerinin toplam değerine göre hesaplanır [1]. Ancak mevcut elektrik dağıtım şebekesinde yapılacak proje çalışmalarında, mevcut yapıların iç tesisat projelerindeki eş zamanlı gücü tespit etmek oldukça zordur. Çünkü hesaplanan güç ile fiili çekilen güç arasında ciddi farklılıklar olabileceği için projesi yapılacak bölge için güç yoğunluğu hesabının yapılması gerekmektedir.

Transformatör bölgesinin güç yoğunluğu hesabı yöntemi konusunda literatürde farklı şekillerle hesaplanan bazı örneklerle karşılaşılmış ve bunlar sırasıyla incelenmiştir. Literatürde rastlanan birinci örnekte, herhangi bir bölgenin alçak gerilimli dağıtım şebekesinin projesinin hazırlanabilmesi için öncelikle o bölgeye ait toplu ve yayılı yüklerin bilinmesine ihtiyaç duyulur. Bölgeye ait yayılı yüklerin belirlenebilmesi için ise o bölgenin güç yoğunluklarının hesaplanması gerekir. Güç yoğunluğu hesabı ise projesi yapılacak bölgenin nüfusunun, kişi başına kabul edilecek güç değerinin ve bölgenin dağıtım şebekesinin toplam hat uzunluklarının bilinmesine bağlıdır. Bu değişkenler bilindiğinde bölgenin güç yoğunluğu hesabı eşitlik (1)'den hesaplanır [2].

$$j = 1{,}1\frac{N.P}{L},\ \left(W\ /\ kişi\right) \tag{1}$$

Eşitlikteki *N* bölgeye ait nüfus sayısını, *P* kişi başına tüketilen *Watt* olarak aktif güç miktarını ve *L* ise dağıtım şebekesinin metre olarak hat uzunluğunu göstermektedir.

Literatürdeki ikinci örnekte, bölgenin alçak gerilim dağıtım şebekesi projesinin yapılabilmesi için toplu yüklerin yanı sıra ihtiyaç duyulan o bölgeye ait yayılı yüklerin belirlenebilmesi için ise iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Birinci yöntem olarak bölgedeki meskenlerin yapılaşmasında farklılık olması halinde (yani farklı katlara sahip binaların bulunması hali) yayılı yük için kişi başına ortalama güç kullanılır. Bu durumda 1970'li yıllarda İstanbul için puant saatlerinde yapılan incelemede kişi başına alınacak ortalama güç değerinin 130 *W/kişi* olarak alınması gerektiği belirlenmiştir. Eğer bölgedeki mesken yapılaşması homojen karakterde olursa, ikinci yöntem olarak ifade edilen şebekenin bir metre uzunluğunda ve binalardaki kat başına çekilen ortalama güç kullanılır. İkinci yöntemde İstanbul'da puant saatlerinde yapılan inceleme sonucunda, bu değerin 40 *W/m.kat* şeklinde olması gerektiği hesaplanmıştır. Geçmişte yapılan sözü edilen çalışmada küçük yerleşim bölgeleri için belirlenmiş bir değer olmamakla birlikte, hem kişi başına alınacak ortalama güç hem de metre başına binadaki kat başına çekilen ortalama güç değerleri olarak kasabalarda İstanbul için alınan değerlerin %75'i, köylerde ise %50'si alınabileceği belirtilmiştir [3].

Literatürde karşılaşılan üçüncü örnekte, yerleşim bölgelerinin özelliklerini dikkate alan iki farklı yöntem önerilmiştir [4]. Birinci yöntemde enerji analizörleriyle alçak gerilim panosunun kol çıkışlarında ve apartmanlarda yapılan ölçümler neticesine göre *W/kişi*, daha sonra imar planında belirtilen kat adedi ve daire sayısına göre yayılı yük *j* (*W/m*) hesap edilir, abone güçleri, tespit edilen yayılı yük *j* (*W/m*) ile kol uzunluklarının çarpımı ile bulunur. Aynı çalışmanın ikinci yöntemi de kasaba ve nüfusu küçük olan iller için önerilmiştir. Bu yöntemde güç yoğunluğunun (*j*) tespiti için yerleşim biriminin güncel nüfusu (son resmi nüfus sayımı) esas alınarak ve nüfus başına 100 *W*'tan aşağı olmamak üzere bölgenin durumuna göre tespit edilen kişi başına güç, nüfus ile çarpılarak toplam abone gücü ihtiyacı hesaplanır. Bu güç mevcut şebeke uzunluğuna bölünerek ortalama *j* (*W/m*) değeri eşitlik (2)'den bulunur, şebeke uzunluğunda tüketim katsayısı da dikkate alınmalıdır [4].

$$j = 1{,}1\frac{P_{Abone}}{k_1.L_1 + k_2.L_2 + \ldots + k_n.L_n},\ \left(W\ /\ kişi\right) \tag{2}$$

Eşitlik (2)'den bulunan ortalama değere göre dağıtım transformatörünün alçak gerilim tarafından ayrılan *n*. kola ait yük yoğunluğu ise eşitlik (3)'ten hesaplanır.

$$j_n = j.k_n \tag{3}$$

Eşitlikte P_{Abone} son nüfus sayımına göre *Watt* olarak abone gücü ihtiyacını, L_n dağıtım transformatörünün alçak gerilim panosunun çıkışındaki *metre* olarak kol uzunlukları ve k_n ise sosyoekonomik (gelişmişlik) duruma göre tespit edilen *n*. kola ait tüketim katsayılarını göstermektedir. Tüketim katsayısı %50 ile %100 değerleri arasında bir değer alınabilir [4].

Nüfus bilgisi, ülkemizde 2008 yılından bugüne kullanılmakta olan adrese dayalı kayıt sistemi üzerinden il veya bölge bazında temin edilebilmektedir [5]. Planlanan dağıtım şebeke uzunluklarının bilgisi de bölgenin imar planları veya yerel yönetimler tarafından hazırlatılan hali hazır planlar üzerinden temin edilebilmektedir. Kişi başına tüketilen güç miktarı ise genel kabullenmeler veya bölge bazlı ölçümler üzerinden yapılmaktadır.

Literatürde rastlanan dördüncü örnek ise, Konya iline ait dağıtım şebekesi üzerinde ölçümle yapılan bir lisansüstü çalışmadır. Çalışmadaki ölçümler, mesken ve ticarethane grupları için ayrı ayrı yapılmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede kırsal kesimler ile kentin sınır mahallelerindeki bağımsız bölüm başına tüketim değerleri ortalama olarak 570 *W/bölüm* iken, orta gelir seviyesindeki yerleşim yerlerinde bu gücün 750 *W/bölüm'* e çıktığı ve gelir seviyesi durumu arttıkça 1250 *W/bölüm*'e hatta 2500 *W/bölüm*' e kadar çıkabildiği belirtilmiştir [6].

Elektrik dağıtım tesislerinin daha sağlıklı tasarlanabilmesi için, güç yoğunluğunun ve kişi başına tüketilen gücün doğru ve hassas olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle konuyla ilgili bu çalışma için doğru verilerin alınabileceği ve daha büyük örneklere temel teşkil edebilecek İstanbul'da üç farklı yerleşim bölgesi seçilmiştir. Çalışmada yerleşim bölgelerinin güç yoğunluğu hesabında kullanılan kişi başına tüketilen güç değerleri incelenerek, bölgelerdeki kişi başına tüketilen güçler karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

II.MATERYAL VE METOD

Türkiye'deki elektrik abonelerinin yaklaşık %83,41'i mesken abonesidir [7]. Bu kullanıcıların tüketim değerlerinin tespit edilmesi ve modellenmesi, il ve ülke bazında yapılacak çalışmalara ışık tutabilir. Bu nedenle, mesken abonelerindeki kişi başına tüketilen gücün tespitinin yapılması ve yapılardaki bağımsız bölüm sayılarını doğru tespit etmek için çalışmada yerleşim bölgeleri sınırlandırılmış ve çok bloklu site tarzındaki konut alanlarında ölçümler yapılmıştır.

Çalışma kapsamında seçilen yerleşim bölgelerinde farklı farklı noktalarda uzun dönemli ölçümler yapılmıştır. Ancak ölçüm yapılan yerlerde ikamet eden kişi sayılarının değişme ihtimalinin yüksek olması, kişi bazında günlük elektrik kullanım oranlarının değişebilir olması gibi nedenlerden dolayı, yapılardaki bağımsız bölüm sayılarına göre tespitler yapılmış ve her bağımsız bölümde ortalama kişi bulunacağı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Ortalama kişi sayısı için, ölçüm yapılan bölgeye ait İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yayımlanan hane başına düşen ortalama kişi sayısı verileri kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında mesken ağırlıklı ve nüfus yoğunluğunun fazla olması nedeniyle, İstanbul Anadolu yakasında yer alan Kadıköy, Kartal ve Sancaktepe ilçeleri seçilmiştir. Bu çalışma için sözü edilen bölgelerde ise mesken ağırlıklı yerleşim bölgeleri tercih edildiğinden çok bloklu siteler çalışma alanı olarak seçilmiştir. Seçilen yerleşim bölgeleri içerisinde bulunan dağıtım trafolarının alçak gerilim çıkışlarında bulunan alçak gerilim (AG) dağıtım panolarında kısa (4 ay) ve uzun dönemli (2 yıl) ölçümler yapılmıştır.

Kısa dönemli ölçümlerde, AG dağıtım panolarına enerji kalite analizörü (Power Logic ION 7650 model) takılmış ve uzaktan izleme yapılmıştır. Cihaz üzerinden modem aracılığıyla veriler 10 dakikalık periyotlarla alınmıştır. Enerji kalite analizörü; gerilim, akım, nötr ve toprak akımı, güç, frekans, güç faktörü, talep, enerji ve kullanım süresi ölçümlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca cihaz, güç ve enerji ölçümü, olay ve minimum/maksimum kaydı tutma, geçmiş kaydı tutma (800 kanala kadar), genişletilebilir bellek, çökme/yükselme izleme, harmonik ölçümü, 256 örnek/çevrim hızıyla dalga formu yakalama, ayar

noktaları, dijital ve analog I/O ve internet uyumlu çok portlu iletişim, simetrik bileşen ölçümleri, hızlı geçici değişiklik algılama, 1024 örnek/çevrim hızıyla dalga formu yakalama ve güç kalitesi uyumluluğu izleme özelliklerini barındırmaktadır. IEC 61000-4-30 A sınıfı, IEEE 519/1159, EN50160, IEC 61000-4-7/4-15 güç kalitesi uyumluluğunu izleme ve 3 fazlı, 4 kadranlı ölçüm, 0,2 sınıfı hassasiyet (IEC, ANSI) sağlamaktadır [8].

Uzun dönemli ölçümler ise Enerjisa İstanbul Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye ait Scada sistemi üzerinden temin edilmiştir [9].

Dağıtım şebekeleri tasarlanırken, kurulacak tesisin maksimum çekilecek gücü karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada kişi başına düşen maksimum gücün bulunması amaçlanmıştır. Bu gücü bulmak için de kısa ve uzun dönemli ölçümlerde, aylık bazdaki maksimum tüketimler dikkate alınmıştır.

Ölçüm yapılan sitelerdeki abone sayıları bilinmektedir, ancak her aboneye ait kullanıcı sayılarının tespiti mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 2022 yılı için yayımlanan Tablo 1'de verilen ilçe bazlı hane halkı büyüklüğü verileri kullanılmıştır [10]. Tespit yapılan üç ilçedeki abone sayıları ile o ilçelere ait hane halkı büyüklüğü çarpılarak sitedeki kişi sayısına ulaşılmıştır.

Tablo 1. 2022 Yılına Ait Ortalama Hane Halkı Büyüklüğü

İlçe Adı	**Ortalama Hane Halkı Büyüklüğü**
Kadıköy	2,32
Kartal	2,97
Sancaktepe	3,52

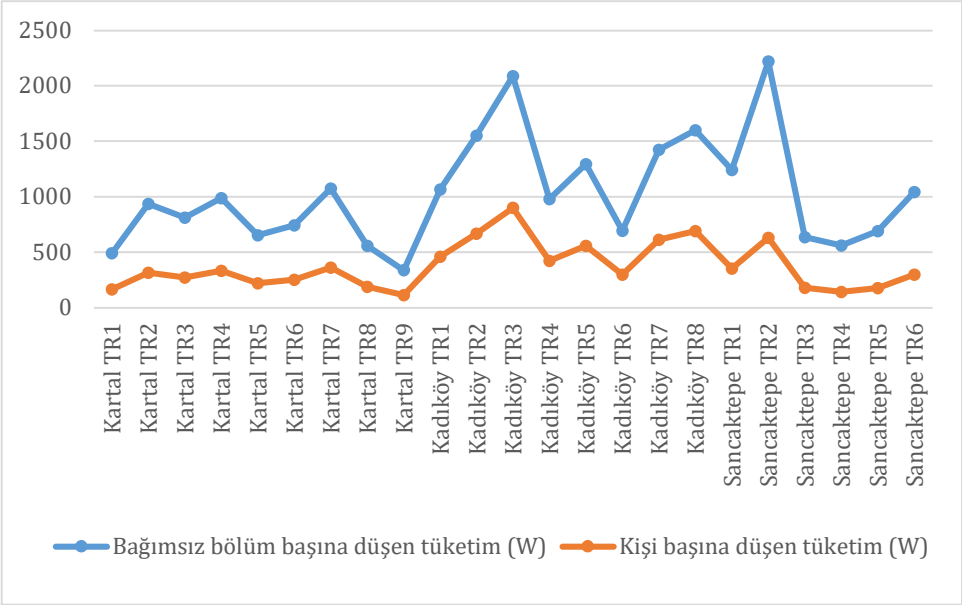
Kadıköy ilçesinde ölçüm yapılan yerlerde toplam 2748 adet abone bulunmaktadır. Kadıköy ilçesine ait ortalama hane halkı verileri kullanıldığında 2748 abone sayısına karşılık olarak 6375 kişi bulunduğu kabul edilmiştir. Bu aboneler toplam 8 adet dağıtım trafosundan enerji almakta ve trafoların toplam kurulu güçleri 12800 kVA'dır. Kartal ilçesinde ölçüm yapılan yerleşim alanında toplam 2897 adet abone olduğundan, Tablo 1'deki verileri kullanarak bölgedeki nüfus 8604 kişi olarak hesaplanmıştır. Bu ilçedeki aboneler ise toplam 9 adet dağıtım trafosundan enerji almakta ve dağıtım trafolarının toplam kurulu güçleri 13200 kVA'dır. Sancaktepe ilçesinde ise ölçüm yapılan yerlerde toplam 2154 adet abone bulunmaktadır. Bu ilçede 2154 abone sayısına karşılık düşen nüfus 7860 kişi olarak kabul edilmiştir. Bu aboneler 9600 kVA kurulu güce sahip toplam 6 adet dağıtım trafosundan enerji almaktadır.

III.SONUÇLAR

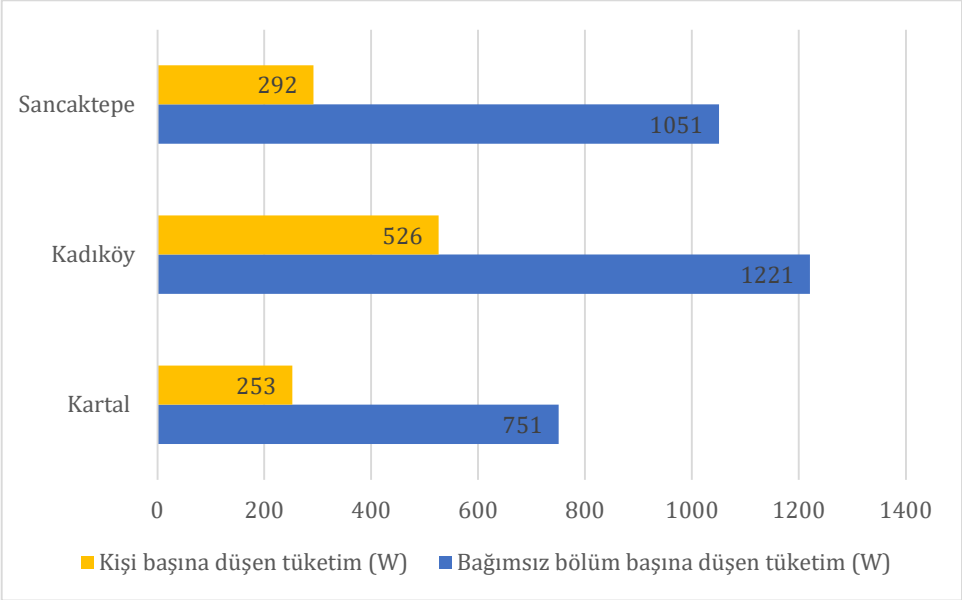
Kadıköy ilçesinde 8 adet, Kartal ilçesinde 9 adet ve Sancaktepe ilçesinde 6 adet trafodan enerji alan yapılar ve bağımsız bölümler tespit edilmiş ve ortalama hane halkı sayısı ile çarpılarak, trafolardan enerji alan kişi sayısına ulaşılmıştır. Dağıtım transformatörlerinden yapılan ölçümler neticesinde, her bir transformatörden kişi başına çekilen güç ve bağımsız bölüm başına çekilen güç değerleri Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1'deki grafikten görüleceği üzere, her bir transformatörün beslediği yapılarda tüketilen güçler birbirinden farklıdır. Bunu daha da genelleştirebilmek için, ilçe bazında tüketim oranlarını bulmak gerekir. Bu nedenle her bir ilçe için, transformatörlerdeki tüketim değerlerinin kişi bazında ve bağımsız bölüm bazında ağırlıklı ortalamaları hesaplanmış ve Şekil 2'deki grafikte gösterilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde Kartal bölgesinde bağımsız bölüm başına tüketilen güç 751 *W/bölüm* iken, Sancaktepe bölgesinde 1051 *W/bölüm* ve Kadıköy bölgesinde ise 1221 *W/bölüm* olduğu görülmektedir. Kişi başına tüketilen güçler ise, Kartal bölgesinde 253 *W/kişi*, Sancaktepe bölgesinde 292 *W/kişi* ve Kadıköy bölgesinde ise 526 *W/kişi* olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Transformatör bazında kişi başına ve bağımsız bölüm başına tüketilen güç



Şekil 2. İlçe bazında kişi başına (*W/kişi*) ve bağımsız bölüm başına tüketilen güç (*W/bölüm*)

IV.TARTIŞMA

İstanbul'un Kadıköy, Kartal ve Sancaktepe ilçelerinde seçilen çok bloklu sitelerde yapılan ölçümlerde, her bir bölgede benzer yaşam alanları seçilmesine rağmen farklı sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Kartal ve Sancaktepe bölgelerinde kişi başına tüketilen güç birbirine yakın iken, Kadıköy bölgesinde tüketilen gücün diğer bölgelerin neredeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Bağımsız bölüm bazında güçler incelendiğinde ise durumun aynı şekilde olmadığı, Kadıköy ile Sancaktepe ilçelerinde bağımsız bölüm başına tüketilen güçlerin birbirine yakın, Kartal ilçesindeki tüketilen gücün en düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıkların en büyük nedeninin, ilçeler arasındaki sosyoekonomik farklılıktan kaynaklanmakta olduğu değerlendirilebilir.

Örneğin Kaynakça [3]'te, İstanbul'da kişi başına tüketilen güç değerinin 130 *W/kişi* olarak alınması önerilirken, Kaynakça [4]'deki kılavuzda söz konusu değerin 100 *W/kişi* olarak alınması gerektiği ifade

edilmiştir. Kaynakça [6]'daki Konya ilinde yapılan bir çalışmada ise, uç değerler göz ardı edildiğinde bağımsız bölüm başına 750 *W/bölüm* ile 1250 *W/bölüm* arasında tüketimin gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan bu çalışmada ise, kişi başına tüketilen güç değerinin minimum 253 *W/kişi* ve bağımsız bölüm başına değerin ise 751 W/bölüm ile 1221 W/bölüm olarak alınması gerektiği sonucu elde edilmiştir. Görüldüğü üzere bu çalışmada elde edilen sonuçlar Kaynakça [6]'daki sonuçlara benzerdir. Bu benzerliğin nedeni, her iki çalışmanın birbirine yakın tarihlerde yapılmış olmasıdır. Genel olarak bu sonuçlardan, gelişen teknolojinin ve toplumun sosyoekonomik durumunun yıllar içinde kişi bazında elektrik tüketimini pozitif yönde etkilediği ifade edilebilir.

V. ÇIKARIM

Elektrik dağıtım projesinde güç yoğunluğu hesaplamaları yapılırken, bölgeye ait sosyoekonomik şartların, enerji kullanım amacının ve enerji kullanılacak yapıların çeşitliliğinin doğru bir şekilde belirlenmesinin çok etkili olduğu çıkarımı yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada inceleme yapılan bölgelere ait elektriksel verileri bizimle paylaşan Enerjisa İstanbul Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım A.Ş. yetkililerine teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR

[1] Yapıcıoğlu, M., Sayan, H. ve Terzioğlu, H., (2019), Karabük İlindeki Alçak Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Elektrik Tüketiminin Analizi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı, Ekim 2019, 411-417.

[2] Soyberk, E., (2013), *Enerji Dağıtımı Dersleri I,* Ders Notları, İstanbul.

[3] Alperöz, N., (1987), *Elektrik Enerjisi Dağıtımı,* Nesil Matbaacılık Yayıncılık San. Tic. A.Ş. İstanbul.

[4] TEDAŞ, (2001, Şubat), Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.(TEDAŞ), Şehir Şebekeleri Og-Ag Elektrik Projesi Yapım Esasları El Kitabı-5, *Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü Dağıtım Hat Ve Şebekeleri Proje Ve Tesis Dairesi Başkanlığı*, Ankara.

[5] TÜİK, (2023, Aralık 26), Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK), *https://nip.tuik.gov.tr/Home/Adnks*. Türkiye İstatistik Kurumu Web Sitesi: https://nip.tuik.gov.tr/ adresinden alındı.

[6] Konar, E., (2021), Dağıtım Şebekesinde Ölçüme Dayalı Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[7] EPDK, (2023), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu https://www.epdk.gov.tr, Ankara.

[8] Schneider Elektrik, (2024, Ocak 6), *https://www.se.com/tr/tr/product-range/1460-ion7550-ion7650/#overview*. Schneider Elektrik Web Sitesi: https://www.se.com/tr/tr/ adresinden alındı.

[9] AYEDAŞ (2023), Enerjisa İstanbul Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım A.Ş. (AYEDAŞ), https://www.ayedas.com.tr, İstanbul.

[10] İstanbul Planlama Ajansı, (2023, Aralık 24). *https://data.ibb.gov.tr/dataset/ilce-bazli-ortalama-hane-halki-buyuklugu*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Web Sitesi: https://data.ibb.gov.tr adresinden alındı.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Bisiklet Endüstrisinde Şasi İmalatında Magnezyum Kullanımının Yapısal Analizi

Ümit YAVUZARSLAN[a], Eren ERSOY[a], Yusuf ALTUN[b], Merve Saide KAPLAN[a]*

[a]Volta Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tasarım Merkezi, Cumayeri Fabrika, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** tm_sef@volta.com.tr

ÖZET

Günümüzde bisiklet endüstrisi, sürekli olarak yeni malzemeler ve tasarım teknolojileri üzerinde araştırmalar yapmaktadır. Bu araştırmaların bir sonucu olarak, son yıllarda bisiklet şasisi tasarımında önemli yenilikler ve gelişmeler yaşanmaktadır. Bu makalede, magnezyumun bisiklet şasisi malzemesi olarak kullanılması üzerine bir analiz sunulacaktır. Magnezyum, son dönemlerde bisiklet endüstrisinde artan ilgiyi çeken bir malzemedir. Hafifliği, yüksek mukavemeti ve titreşim absorbe edici özellikleriyle dikkat çeken magnezyum, bisiklet şasisi üretiminde potansiyel avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, magnezyumun bisiklet şasisi malzemesi olarak kullanılmasının getirdiği faydalar ve potansiyel zorluklar ele alınacak ve bu malzemenin bisiklet performansı, konfor ve dayanıklılık üzerindeki etkileri incelenecektir. Analiz, magnezyumun bisiklet endüstrisindeki yerini ve potansiyel geleceğini değerlendirecek ve bu malzemenin diğer geleneksel bisiklet şasi malzemeleriyle karşılaştırılmasını sağlayarak okuyuculara kapsamlı bir bakış açısı sunacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, bisiklet endüstrisindeki yenilikçi malzeme ve tasarım trendlerini anlamak isteyenler için değerli bir kaynak olacaktır. Magnezyumun bisiklet şasisi tasarımında kullanılması, potansiyel olarak endüstriye yeni bir boyut kazandırabilir ve bu makale, bu heyecan verici gelişmeyi daha yakından incelemek için bir başlangıç noktası olacaktır.

Anahtar Kelimeler: ***Magnezyum, Şasi, Analiz, Bisiklet, Malzeme***

Structural Analysis of Magnesium Usage in the Bicycle Industry

Ümit YAVUZARSLAN[a], Eren ERSOY[a], Yusuf ALTUN[b], Merve Saide KAPLAN[a]*

[a]Volta Motor Industry and Trade Inc. Design Center, Cumayeri Factory, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** tm_sef@volta.com.tr

ABSTRACT

Today, the bicycle industry is constantly researching new materials and design technologies. As a result of this research, there have been significant innovations and developments in bicycle frame design in recent years. In this paper, an analysis of the use of magnesium as a bicycle frame material will be presented. Magnesium is a material that has recently attracted increasing interest in the bicycle industry. Magnesium, which attracts attention with its lightweight, high strength and vibration absorbing properties, offers potential advantages in bicycle frame production. This paper discusses the benefits and potential challenges of using magnesium as a bicycle frame material and analyses its effects on bicycle performance, comfort and durability. Our analysis will assess the place and potential future of magnesium in the bicycle industry and provide readers with a comprehensive perspective by providing a comparison of this material with other conventional bicycle frame materials. Ultimately, this paper will be a valuable resource for those seeking to understand innovative material and design trends in the bicycle industry. The use of magnesium in bicycle frame design could potentially bring a new dimension to the industry, and this article will be a starting point for a closer examination of this exciting development.

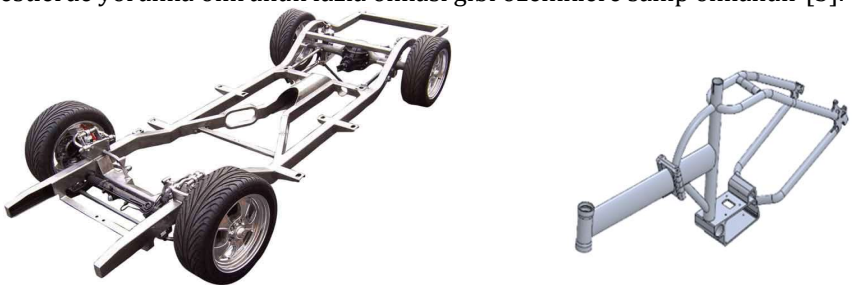
Keywords: Magnesium, Chassis, Analysis, Bicycle, Material

I. GİRİŞ

Volta Motor A.Ş. Düzce merkezli bir elektrikli ve içten yanmalı mikromobilite araçları imalatı yapan bir firmadır. Firma kendini sürekli yenilemekte, yerlilik oranını ve Ar-ge yatırımlarını arttırmaktadır. Bu çalışmada da bisiklet sektörü için, otomotivin parlayan yıldızı olan Magnezyum elementi incelenmiştir. Magnezyum, doğada çok bulunması, işlenebilirliği, döküme uygunluğu, hafifliği, geri dönüşüme uygunluğu gibi nedenlerden ötürü günümüzde popüler bir element haline gelmiştir. Mevcut küresel ısınma ve artan CO2 içeriği senaryosunda, sınırlayıcı emisyon mevzuatının getirilmesi, magnezyum alaşımları ve kompozitlerindeki büyülenmeyi tetikledi. En düşük yoğunluk nedeniyle, magnezyumun kullanımı son on yılda artmış ve çevre üzerindeki emisyon tehdidini en aza indirmek için tasarım ve üretim alanında işleme, geliştirme, iyileştirme ile ilgili çeşitli programlar devam etmektedir [1]. Şu anda, magnezyum (Mg) ve alaşımları en iyi yeşil malzemeler olarak bilinmektedir ve uygulamaları çeşitli alanlarda dünya çapında gelişmektedir [2]. Volta Motor A.Ş. olarak daha çevreci ve daha hafif bisiklet üretebilmek, zorlu kaynak proseslerini ortadan kaldırmak adına döküm yöntemi ile tek parça bisiklet şasisi üretmek için bu çalışma yapılmıştır.

Ansh Mehra ve arkadaşları bir bisiklet şasisi tasarlamış ve şasinin tanımını şu şekilde ifade etmiştir: Şasi, süspansiyon, direksiyon kolu vb. gibi diğer tüm bileşenlerin monte edildiği elektrikli bisikletin ana destek yapısıdır [3]. Bisiklet için bazı çalışmalarda şasiye çerçeve veya kadro da denilir (frame). Şasinin tasarımı, maksimum performans (güç, sertlik ve dayanıklılık) ve güvenlik ile birlikte minimum ağırlık elde etmek için optimize edilmelidir [4]. Bir ulaşım aracının temel bileşeni olan şasiden en temel fonksiyonlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Enerji tüketiminin az olması için olabildiğince hafiflik,
- Üretim kolaylığı açısından olabildiğince az sayıda parçadan oluşmalı,
- Kullanıcıların ihtiyacı olan bagaj ve yolcu kapasitesi ihtiyacını karşılamalı,
- Yolculuk sırasında oluşan titreşimleri olabildiğince sürücüye hissettirmemeli,
- Olası çarpışma ve kazalara karşı dayanıklılık,
- Üretilmesi kolay ve ekonomik malzeme seçimi,
- Şasiye etki eden statik ve dinamik yüklerin eşit dağıtılması.
- Yapılan testlerde yorulma ömrünün fazla olması gibi özelliklere sahip olmalıdır [5].



(a) (b)

Şekil. 1a) otomobil şasi örneği [5], 1b) Bisiklet şasi örneği.

Aşağıdaki tabloda özellikle otomotiv endüstrisinde şasi ve diğer metal parça yapımında kullanılacak olan malzemelerin kriterleri gösterilmiştir [6].

Tablo 1. Otomotiv Endüstrisinde kullanılacak malzemelerin temel özellikleri [6].

İHTİYAÇ	EYLEM	MALZEMENİN ÖNEMİ
Kaynaklara Erişim	Tasarlanan aracın hafif ve enerji tüketiminin az olması.	Hafif elementlerin ve alaşımlarının kullanılması, üretilmesi.
Çevresel Etkiler	Kullanım ve üretim süreçlerinde salınan kirletici gazların az olması.	Gaz salınımı az ve zararsız atık bırakan malzeme tercihi.
	Geri dönüştürülebilir olması.	Geri dönüşümü olan malzeme ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması.
Düşük Maliyet	Her prosesde maliyetlerin minimize edilmesi	Hem üretirken hem de malzeme tercihinde ekonomik malzeme ve proses kullanımı

Tablo 1'de ki kriterler göz önüne alındığında günümüzde şasi tasarım ve üretiminde kullanılan başlıca malzemeler çelik, alüminyum, kompozit malzemeler, magnezyum ve titanyum sektörde kullanılan başlıca malzemelerdir [5].

Magnezyumun birçok özelliği ile bu sıralamada kendine yer bulduğu görülmektedir. Magnezyumun teme özellikleri, 12 numaralı atom numarasına ve Mg simgesine sahip olmasıdır. Parlak gri renge sahip, yoğunluğu az ve erime derecesi düşüktür. Bu da üretim sırasında daha az ısı enerjisi ile işlenmesine olanak sağlar. Doğada fazla bulunması, geri dönüşümüm kolay olması, yoğunluğunun düşük olması nedeniyle kütlesinin de hafif olması, işlenmesinin kolay olması (kesme ve döküm), titreşimleri absorbe etmesi, termal iletkenlik ve termal yorulma performansının iyi olması magnezyumu havacılık, uzay, otomotiv ve birçok alanda tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir [7].

Özkütlelere bakıldığında magnezyumun; çeliğe göre %75, alüminyum ile kıyaslandığında %33 daha hafif bir malzeme olması, yukarıda sayılan sektörlerde yapı malzemesi olarak tercih edilmesinin en önemli nedenlerindendir. Magnezyumun bitmiş hali kadar üretim sırasında ve üretim proseslerinde de dökülebilirlik ve işlenebilirlik açısından önemli kolaylıklar sağlar ve bunlarda bir tercih nedenidir [8].

Bir binek otomobilin, enerji tüketiminin %86'sı kendi ağırlığını ve insanları ağırlığını taşımak için harcanır. Taşıtın ağırlığı %10 daha azaltılırsa, yapılan kilometre %5-10 daha uzayabilir. 1000 kg'lık bir otomobilde, 1 kg ağırlığın azaltılması 0,016 km/l kilometre artışı sağlayabilir. Bu nedenle, otomobiller ve yapısal malzemeler için ağırlık azaltma teknolojisi, gelişmiş enerji tasarrufu için vazgeçilmezdir. Bu nedenle, çelik ve alüminyum bileşenlerin yerini alma potansiyeline sahip olan yüksek mukavemetli malzemenin hafiflik oranına büyük miktarda kullanılması esastır. Magnezyum metal matrisli kompozitler, otomotiv ve havacılık sektörlerinde kapsamlı yaygın olarak benimsenen kapsamlı ürün yelpazesinde en uygun olanıdır [9].

Tablo 2. Magnezyum ile Diğer Metallerin Fiziksel Kıyaslaması [10].

Metal Adı	Yoğunluk	Erime Noktası	Kaynama Noktası	Ergime Gizil Isısı	Isıl Genleşme Katsayısı	Akma Gerilmesi	Uzama	Sertlik
	gr/cm^3	^oC	^oC	kJ/kg	10^{-6}	N/mm^2	%	HB
Mg	1,74	650	1110	368,640	25,5	88	5	23
Al	2,74	660	2486	398,108	23,9	98	45	30
Fe	7,86	1535	2754	272,213	11,7	265	45	67

Magnezyumun sektörde kabul görmesi birçok özelliğini uygun olmasına rağmen kolay olmamıştır. Sadece geri dönüştürülebilir olması ve hafif olması yeterli olmamıştır. Bir dönem alüminyuma göre maliyetinin fazla olması tercihlerde ikinci plana gerilemesine neden olmuştur. Son yıllarda ise düşen magnezyum fiyatları tüm ilgili sektörleri yine bu malzemeye yönlendirmiş ve üzerinde çalışılmaya ve kullanılmaya başlanmıştır.

Magnezyumda bir metal olduğu için metallerle aynı yöntemlerle şekillendirme proseslerine sahiptir. İmalat yöntemi seçilirken, malzemeden beklenen en verimli özellikler iyi belirlenmeli ve ona göre yöntem belirlenmelidir. En sık kullanılan yöntemler arasından döküm işleminde basınçlı ve kum döküm yöntemi kullanılır. Dökümün yanı sıra ekstrüzyon ile şekillendirme, dövme, haddeleme gibi şekillendirme işlemleri de kullanılabilmektedir. Bu sayılanlar arasında en uygun olan yöntemler ekstrüzyon ve yüksek basınçla döküm işlemleridir [11].

Magnezyuma diğer elementler eklenerek birçok özellikleri daha iyi hale getirilebilmektedir. Aşağıda Tablo 3'te magnezyum katkı malzemesi ve sağladığı katkılar gösterilmiştir.

Tablo 3. Magnezyuma İlave Edilen Bazı Elementlerin Etkileri [12].

Alaşım El.	Ergitme ve Döküm Özellikleri	Mekanik ve Teknolojik Özellikler	Korozyon Özelliklerine Etkisi
Ag		Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımlarını iyileştirir.	Zararlıdır
Al	Dökülebilirliği iyileştirir	Katı eriyik sertleştiricidir	Az etkili
Ca	Etkili tane inceltıcidir, ergimiş metalin oksidasyonunu önler.	Sürünme özelliklerini iyileştirir.	Zararlıdır
Fe	Magnezyum çelik kalıplarla çok yavaş reaksiyona girer.		Zararlıdır
Si	Dökülebilirliği arttırır.		Zararlıdır
Th	Mikroporoziteyi bastırır.	Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımlarını iyileştirir.	
Zn	Ergimiş metalin akışkanlığını arttırır.	Çökelme sertleşmesi ortam sıcaklığında dayanımı arttırır.	Az etkili
Zr	Etkili tane inceltıcidir.	Ortam sıcaklığında çekme iyileştiricidir.	Az etkili
Toprak Alkali	Dökülebilirliği iyileştirir	Yüksek sıcaklıklarda çökelme sertleşmesini iyileştirir.	iyileştirir.

Ulaşım araçlarında üretim verimli ve hafif şasi uygulamaları, aracın yol performansı, sürüş kalitesi, gürültü ve titreşim iletimi gibi birçok parametreyi de iyileştirmelidir. Özellikle son yıllarda üzerinde çalışılan magnezyum, magnezyum alaşımları ve özellikle alüminyum/magnezyum alaşımlarının araçlarda hafiflemeye ve performans artışına neden olduğu görülmüştür [13].

Bir malzemenin çeşitli özellikleri, bisiklet şasisinin yapımında uygun olup olmadığına karar verilmesine yardımcı olur:

Yoğunluk (veya özgül ağırlık), malzemenin birim hacim başına ne kadar hafif veya ağır olduğunun bir ölçüsüdür.

Sertlik (veya elastik modül) teorik olarak sürüş konforunu ve güç aktarım verimliliğini etkileyebilir. Uygulamada, çok esnek bir kadro bile lastiklerden ve seleden çok daha sert olduğundan, sürüş konforu sonuçta daha çok sele seçimi, kadro geometrisi, lastik seçimi ve bisiklet uyumuna bağlı bir faktördür. Çerçevenin dar profili nedeniyle yanal sağlamlığa ulaşmak çok daha zordur ve çok fazla esneklik, öncelikle arka üçgenin bozulması nedeniyle yoldaki lastik sürtünmesi, frenlerin jantlara sürtünmesi ve zincirin dişliye sürtünmesi yoluyla güç aktarımını etkileyebilir.

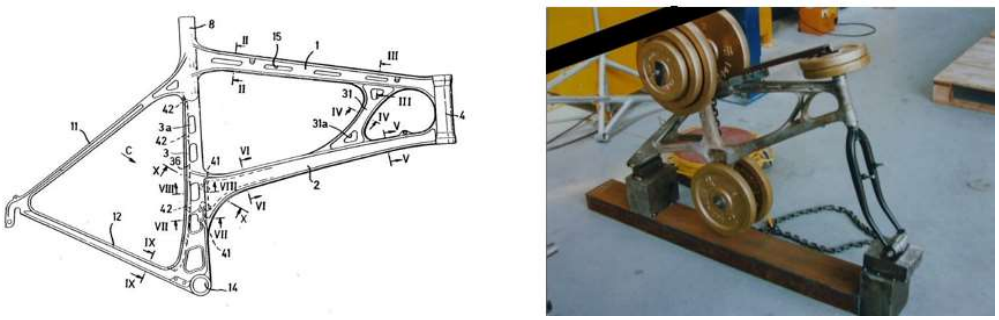
Akma mukavemeti, malzemeyi kalıcı olarak deforme etmek için (çarpışmaya dayanıklılık açısından) ne kadar kuvvete ihtiyaç duyulacağını belirler.

Uzama, malzemenin çatlamadan önce ne kadar deformasyona izin verdiğini belirler (çarpışmaya dayanıklılık açısından).

Yorulma sınırı ve Dayanıklılık sınırı, pedal çevirme veya sürüş çarpmalarından kaynaklanan döngüsel strese maruz kaldığında kadronun dayanıklılığını belirler [14].

Hafif yapının yanı sıra, magnezyumun sunduğu diğer avantajlardan bazıları şunlardır: mükemmel yorulma direnci, çentiklenme ve burulma direnci ve herhangi bir yapısal metal arasında bilinen en yüksek sönümleme kapasitesi. Sonuç, piyasadaki diğer malzemelerden çok daha yumuşak bir sürüştür [15].

İlk magnezyum bisiklet şasi denemeleri 1980'lerde mühendis Frank Kirk tarafından, tek parça dökümden oluşan ve tüpler yerine I kirişlerden oluşan yeni bir çerçeve biçimi şeklinde tasarlanarak yapıldı. Bu teknolojiyle hem yol bisikleti hem de dağ bisikleti kadroları üretmek üzere Britanya'da Kirk Precision Ltd adında bir şirket kurdu. Bununla birlikte, erken dönem ticari başarılara rağmen, güvenilirlikle ilgili sorunlar vardı ve üretim 1992'de durduruldu. Üretimdeki az sayıdaki modern magnezyum şasiler, geleneksel olarak tüpler (boru profil) kullanılarak imal edildi [14]. Görsellerde Kirk Bisikletine ait çizimler ve test sistemi görülmektedir [15].



Şekil. 2 Kirk bisikletine ait çizimler ve test sistemi [15].

Magnezyum, yüksek çekme mukavemetini ve sönümleme özelliklerini korurken, alüminyumdan daha hafif bisiklet çerçeveleri tasarlamak için kullanılabilir. Bütün bunlar çok daha yumuşak, daha verimli bir sürüşe yol açar. Magnezyum ayrıca karbon fiber gibi popüler hafif malzemelerden daha düşük bir fiyat noktasına sahiptir. Magnezyumun yukarıda sayılan birçok özelliğinin sonucunda, magnezyum alaşımları veya kompozitleri ile yapılan bisiklet şasileri ile yapılan bisikletlerde darbe ve titreşim sönümleme yeteneği sayesinde bu bisikletlerde sürücünün daha az enerji harcayarak ve daha rahat bir sürüş yaptığı görülür. Ancak performans ve fiyat avantajlarına rağmen magnezyum hala bisiklet üretiminde bir standart olarak kabul edilmiyor. Nedeni ise magnezyum alüminyumdan daha yumuşak ve daha az stabildir ve üretim süreci enerji yoğundur. Metal aynı zamanda korozyona da yatkındır, bu da bakımını çok zorlaştırır. Üretim engelleri ve karbon fiber gibi yüksek performanslı alternatiflerin birleşimi, konu bisiklet üretiminde magnezyumun daha az popüler bir seçenek haline gelmesine neden olmuştur. Magnezyumun üretimdeki geleceği için umut, yeni alaşımların geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yolu takip eden şirketler, korozyonun olumsuz etkisini azaltmaya, stabiliteyi artırmaya ve magnezyumun daha kullanışlı bir malzeme haline gelmesine yardımcı olabilecek alaşımlar yaratmanın yollarını arıyor.

Magnezyum bisiklet kadrolarının performans faydaları, özellikle kaynak zorlukları ve korozyona karşı geliştirilen teknolojideki ilerlemelerle birlikte dikkate alınmaya değer görülmektedir [16].

Birçok otomotiv firması ve bisiklet üreticisi diğer rakiplerinden farklı olmak, çevreyi korumak, maliyetleri düşürmek, daha az enerji tüketimi ile daha uzun mesafe sürüşünü konforlu bir şekilde müşterilerine sunmak için uzmanlarca çağın müthiş elementi olarak tanıtılan magnezyuma yönelmiştir. Hem malzeme ve alaşımları üzerinde çalışılırken hem de üretim yöntemleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Yapılan araştırmalar magnezyum elementi kullanılarak yapılan parçaların dayanımının, yaygın olan çelik ve alüminyum parçalar kadar iyi olduğu ama bunu daha düşük kütlelerde gerçekleştirebileceğini ortaya koymaktadır. Magnezyum alaşımları veya kompozitlerinin özgül dayanım ve özgül rijitlik değerleri noktasında karşılaştırıldığı diğer metallerle (çelik, alüminyum vs.) karşılaştırıldığında benzer veya biraz daha yüksek değerlerde özelliklerde olduğu görülmektedir [17].

Bu durumu sınamak için Solidworks programı ile Volta Motor A.Ş.'nin üretmiş olduğu VB2 model bisiklet şasisi, hem çelik, hem alüminyum hem de magnezyum malzemesi kullanılarak, 800N kuvvete maruz bırakılmış ve karşılaşılan sonuçlar (stres, yer değiştirme vs) incelenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda, bisiklet kütlesinin azalırken dayanımsal özelliklerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür.



Şekil. 3 Solidworks programında farklı metaller için şasi seçimi.

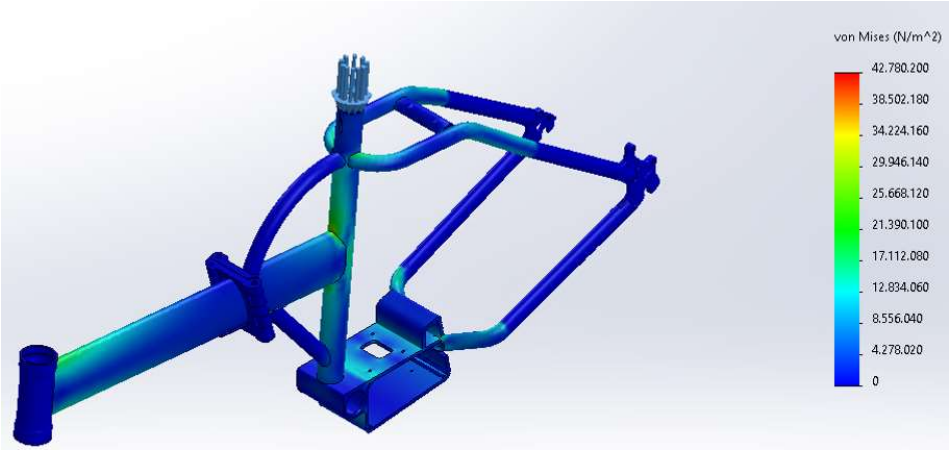
Kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalar bu değerlere göre program tarafından yapılmıştır.

Tablo 4. Analiz için seçilen malzemelerin özellikleri.

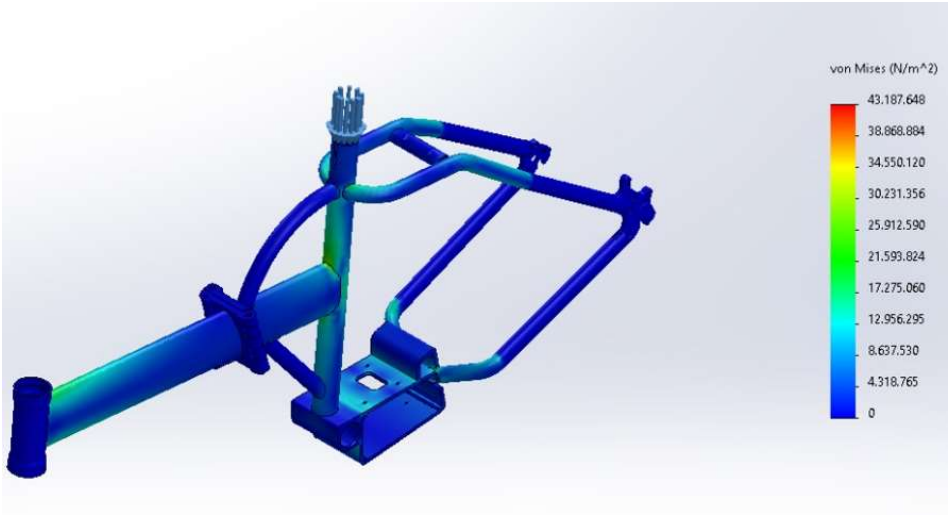
Özellikler	**Magnezyum**	**Alüminyum**	**Çelik**
Malzemenin Adı	Magnezyum Alaşımı	AA356.0-F	ASTM A36 Çelik
Model Tipi	İzotropik Doğrusal Elastik Analizi	İzotropik Doğrusal Elastik Analizi	İzotropik Doğrusal Elastik Analizi
Varsayılan hata kriteri	Bilinmeyen	Bilinmeyen	Maks. von Mises Gerilimi
Elastik modülü	4,5e+10 N/m^2	7,24e+10 N/m^2	2e+11 N/m^2
Poisson oranı	0,35	0,33	0,26
Kütle yoğunluğu	1.700 kg/m^3	2.680 kg/m^3	7.850 kg/m^3
Yırtılma modülü	1,7e+10 N/m^2	2,72e+10 N/m^2	7,93e+10 N/m^2
Termal genleşme katsayısı	2,5e-05 /Kelv	2,14e-05 /Kelvin	
Gerilme mukavemeti		1,45e+08 N/m^2	4e+08 N/m^2
Akma mukavemeti			2,5e+08 N/m^2

Şasi üzerinde dayanımı etkilemeyen noktalar çıkarılıp, şasi sadeleştirilmiştir. Şasi, gerçek sürüşte olduğu gibi ön ve arka tekerlerin bağlandığı noktalardan sabitlenmiştir. Kuvvet, sürücünün oturduğu sele borusundan uygulanmıştır. Bu uygulanan kuvvet karşısında şasinin elastikiyet (Von Mises) ve yer değiştirme (URES) durumları görsellerde paylaşılmıştır.

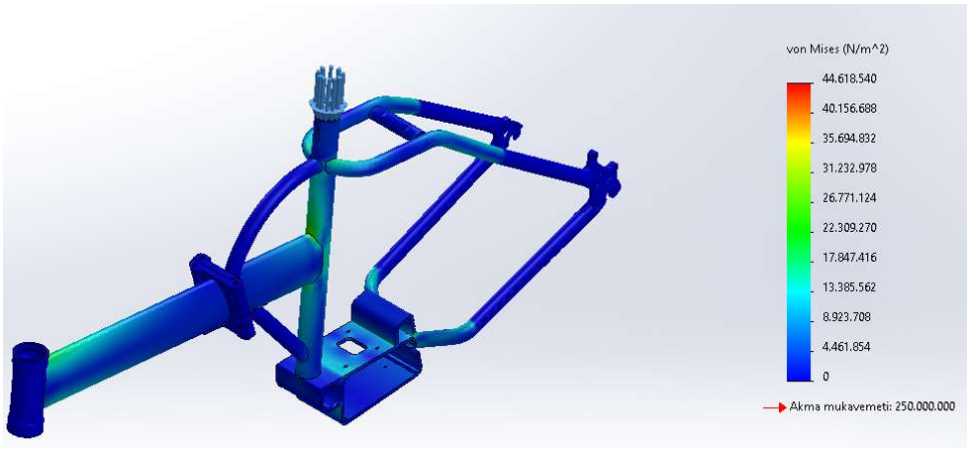
Von Mises verilerine göre şasinin 800N için üç şasi türünün de esnediği ve problemsiz bir şekilde ilk haline geri döndüğü görülmektedir. Üç malzeme türü içinde değerler kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır.



Şekil. 4a Magnezyum şasi için Von Mises Stresi analizi sonucu.

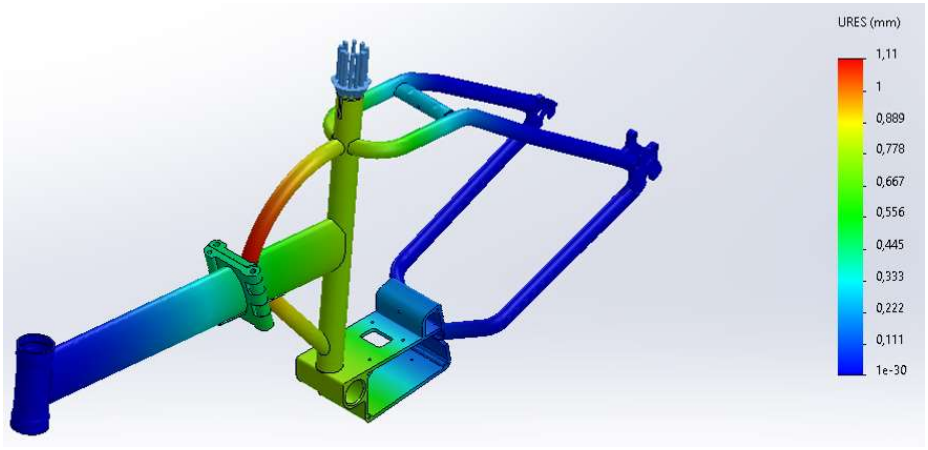


Şekil. 4b Alüminyum şasi için Von Mises Stresi analizi sonucu.

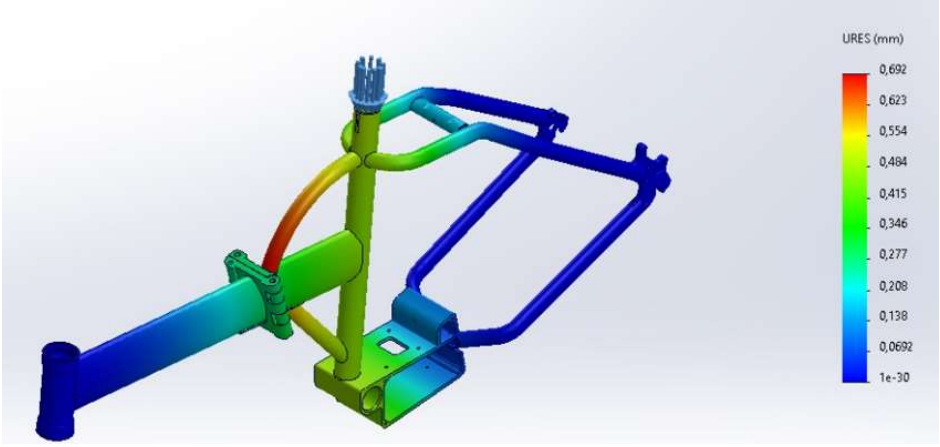


Şekil. 4c Çelik şasi için Von Mises Stresi analizi sonucu.

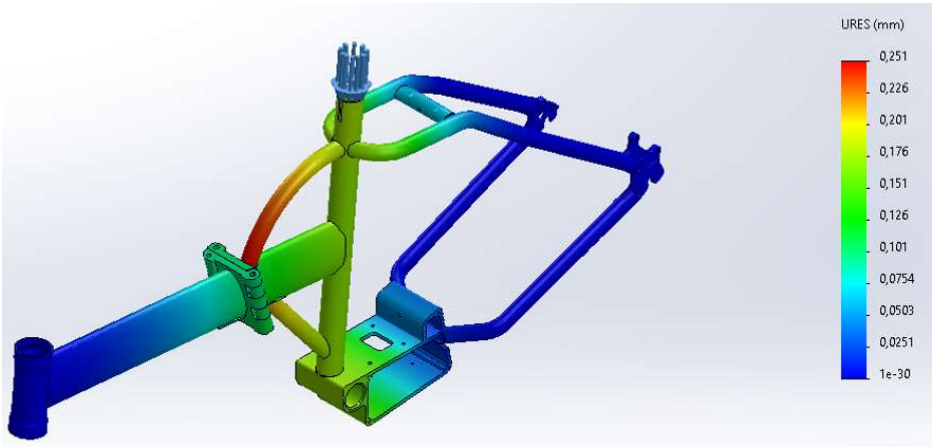
URES yer değiştirme analizinde bir metalin konumundaki değişiklik incelenmektedir. Uygulanan 800N ,'luk kuvvet sonucunda sadece 1 bölgede magnezyum şaside 1,1 mm, alüminyum şasi de 0,692 mm ve çelik şasi de 0,251 mm'lik bir yer değiştirme görülmüştür. Bu bisiklet şasisi için bu kabullenebilir değerler içerisindedir.



Şekil. 5a Magnezyum şasi için URES Yer Değiştirme analizi sonucu.



Şekil. 5b Alüminyum şasi için URES Yer Değiştirme analizi sonucu.



Şekil. 5c Çelik şasi için URES Yer Değiştirme analizi sonucu.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kendine kullanım yeri bulan ve kullanımı giderek artan magnezyum elementi araştırılmış, bisiklet endüstrisinde kullanımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Aynı bisiklet şasisi için yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyum şasi ile magnezyum şasi yapısal olarak karşılaştırılmıştır.

Yapılan araştırmaların karşılaştırılması sonucunda, magnezyumun çevreci ve geri dönüşümü olması, bisiklet şaseleri için yeterli dayanımı sağlarken ağırlığın azaltılması, farklı metaller ile alaşımlarının mümkün olması, ülkemizde yeterli rezervinin bulunması, döküm yöntemleri kullanılarak üretilecek bir şasede, pek çok kaynak işlemine gerek kalmadan hızlı üretimin yapılabilmesi, magnezyum dökümü yapan yerli firmaların bulunması magnezyum şase üretiminin ülkemiz ve bisiklet sektörü için geleceğini ve önemini ortaya koymaktadır.

Elde edilen araştırma sonuçları ve simülasyon ortamında yapılan analizler ışığında magnezyumun otomotiv sektöründe olduğu gibi bisiklet endüstrisinde de yaygın olarak kullanılabileceği görülmüştür. Geçmiş yıllarda yaşanan olumsuzlukların ve fiyat kriterinin gelişen teknoloji ile giderilmekte olduğu, artan döküm ve imalat teknolojileri tecrübeleri ile daha iyi kalitede ve dayanımda magnezyum şasiler ve parçalar elde edilebileceği, bu yönde yapılan bilimsel çalışmaların da giderek arttığı gözlenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] D. Kumar, R. K. Phanden, L. Thakur, "A Review On Environment Friendly And Lightweight Magnesium-Based Metal Matrix Composites And Alloys" Materials Today: Proceedings, Volume 38, Part 1, 2021, Pages 359-364,ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.424 .

[2] T. Xu, Y. Yang, X. Peng, J. Song, F. Pan, Overview of advancement and development trend on magnesium alloy, J. Magnes. Alloys 7 (3) (2019) 536–544.

[3] A. Mehra, R. Singh, A. S. Chauhan, K. Nath, A. Yadav , "Design and analysis of an electric bike chassis", Materials Today: Proceedings, Volume 62, Part 3, 2022 , Pages 1510-1520, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.247 (Erişim tarihi: 31/03/2024).

[4] S. Zhang, A. Chen, "A practical design process to optimize fatigue performance for chassis components" , SAE Technical Paper, 2009, ISSN: 0148-7191 , e-ISSN: 2688-3627, https://doi.org/10.4271/2009-01-1227 (Erişim tarihi: 31/03/2024).

[5] https://malzemebilimi.net/otomobil-sasilerinin-tarihsel-gelisimi.html, Erişim tarihi: 31/03/2024.

[6] https://muhendisgelisim.com/otomotiv-sanayiide-kullanilan-malzemeler/, Erişim tarihi: 31/03/2024.

[7] https://madencilikturkiye.com/wp-content/uploads/2018/09/Madencilik-Turkiye-Dergisi-Sayi-112.pdf , Madencilik Türkiye Dergisi, 15 Temmuz 2023, Sayı 112, Sayfa 66-88, Erişim Tarihi: 31/03/2024.

[8] https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Turkiyede-dunyada-magnezyum.pdf , Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Dünyada ve Türkiye'de Magnezyum Raporu, Dr. Gonca Eroğlu, Erişim tarihi: 31/03/2024.

[9] W.J. Joost, P.E. Krajewski, "Towards Magnesium Alloys For High-Volume Automotive Applications", Scripta Materialia, 128 (2017) 107–112, https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.07.035 .

[10] A.S. Vanlı, "Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006, İstanbul.

[11] O. Atalay , "Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006, İstanbul.

[12] Ş. Açıkgöz, "Magnezyum Lityum Alüminyum Alaşımlarına Alaşım Elementi İlavesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2022, Sakarya.

[13] U. Özdemir, "Hafif Metallerin Otomotiv Sektöründeki Yeri Ve Uygulamaları", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Yüksek Lisans Tezi, 2010, İstanbul.

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_frame , Erişim tarihi: 31/03/2024.

[15]https://web.archive.org/web/20160314164418/http://paketabike.com/index.cfm?page=technology , Erişim tarihi: 31/03/2024.

[16] https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/magnesium-investing/magnesium-the-other-bike-frame-metal/ , Erişim tarihi: 31/03/2024.

[17] K. Kandemir, A. Çetin Can, "Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli" PAJES - Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Cilt:9, Sayı:1, Sayfa:37-45, Yıl: 2003.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Aynı Binada Kolonların Farklı Yerleştirilmesi Durumunda Binada Oluşan Düzensizlikler ve Moment Etkilerinin İncelenmesi

*Esra MUTİ *, Ercan ÖZGAN [b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık ABD, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** esra.muti@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, Sakarya ili Serdivan İlçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binanın analizi yapılmıştır. Binada taşıyıcı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde farklı yerleştirilmesi durumunda binada ki düzensizlikler ve moment etkisi incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m uzunluğu ise 18 m'dir. Bina modelinin "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" ise 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla olmak üzere toplam 6 aks bulunmaktadır. Oluşturulan bina modellerinde kirişler 30x60 cm alınırken döşeme kalınlığı ise 15 cm olarak alınmıştır. Oluşturulan 3 model binadan referans olan bina modeline 2018 Türk deprem yönetmeliği şartlarına uygun olarak "x" ve "y" yönlerinde kolonlar yerleştirilmiş, diğer iki model binaya yerleştirilen kolonlar ise farklı şekillerde yerleştirilmiştir. Tarafımızca oluşturulan Referans model bina ile kolon yerleşimi piyasa da ofisi olan bir inşaat mühendisi ve bir mimar tarafından yapılan iki örnek model bina İdeCad programı ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda deprem etkisine maruz bırakılan 3 model binada oluşan düzensizlikler ve moment etkileri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Aynı bina planına kolonların farklı yerleştirilmesi durumunda binalarda ki düzensizliklerin ve momentlerin değişimleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Deprem performansı, Düzensizlikler, Kolon, Moment, Tasarım*

Examination of the Effects of Columns Placed in Different Shapes in a Reinforced Concrete Building Model on the Earthquake Behaviour of the Structure

ABSTRACT

In this study, a reinforced concrete building located in Beşköprü neighbourhood of Serdivan District of Sakarya province was analysed. If the columns, which are the load-bearing elements of the building, are placed differently on the building project, the irregularities and moment effects in the building are examined. In the building model created for this purpose, the floor height is 3 meters and the building has ground floor + 3 floors. The building width is 15 m and the length is 18 m. While there are 4 axes with 5 meters intervals in the "x direction" of the building model, there are a total of 6 axes in the "y direction" with 3.5 m, 3 m, 5 m, 3 m and 3.5 m intervals. In the building models created, the beams were taken as 30x60 cm and the floor thickness was taken as 15 cm. Columns were placed in the "x" and "y" directions in the reference building model of the three model buildings created, in accordance with the requirements of the 2018 Turkish earthquake regulations, and the columns placed in the other two model buildings were placed in different ways. The reference model building created by us and the column layout of two sample model buildings built by a civil engineer and an architect who have an office in the market were analysed with the IdeCad program. As a result of the analysis, irregularities and moment effects in 3 model buildings exposed to earthquake effects were calculated and compared. The changes in irregularities and moments in buildings are shown when columns are placed differently in the same building plan.

Keywords: *Earthquake performance, Irregularities, Column, Moment, Design*

I. GİRİŞ

Modern şehirleşme süreçleri, dünya genelinde artan nüfus ve kentsel yoğunlaşma eğilimleri ile birlikte, yapıların tasarım ve inşasında daha karmaşık ve özen gerektiren bir süreci beraberinde getirmiştir[1]. Bu süreçte, özellikle deprem gibi doğal afetlerin etkisi altında bulunan bölgelerde, yapıların dayanıklılığı ve

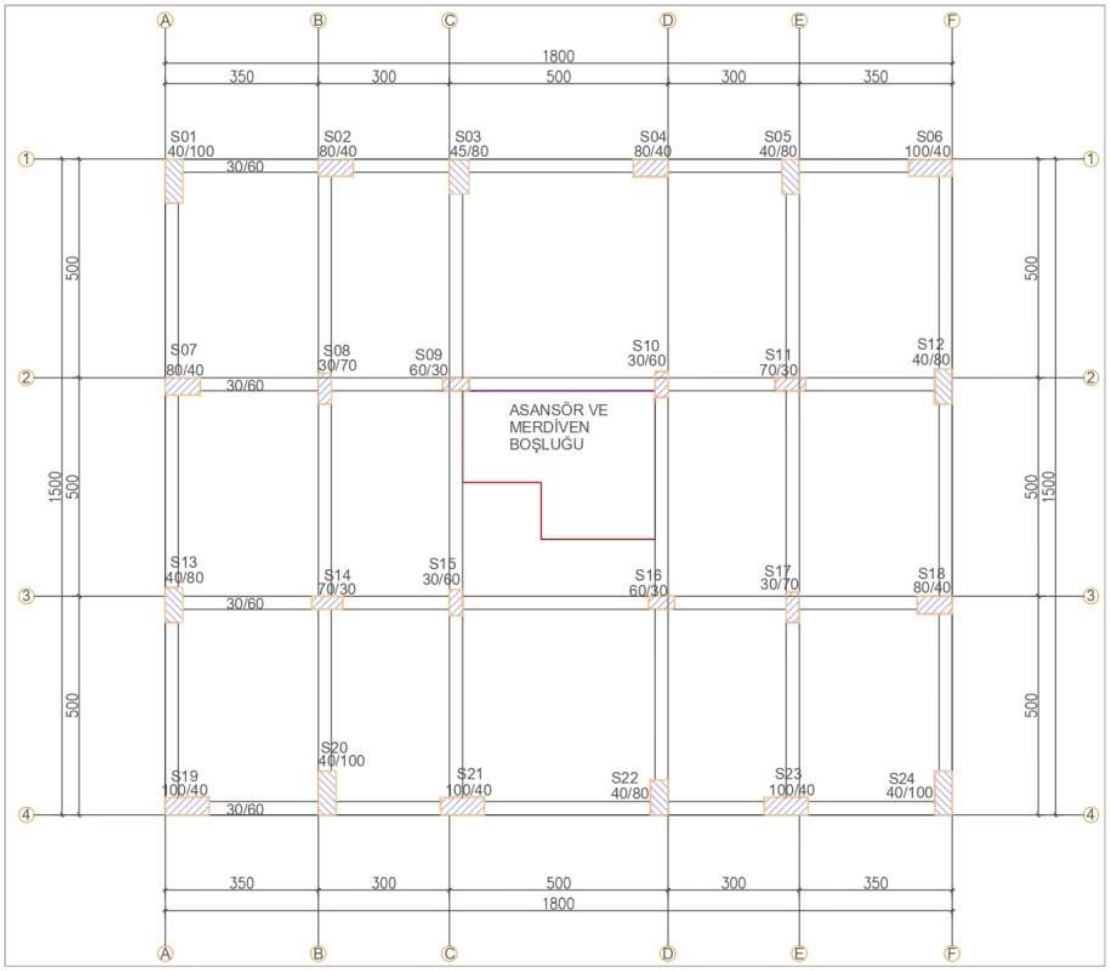
güvenliği mühendislik topluluğu için temel bir öncelik haline gelmiştir. Betonarme yapılar, sağlam ve mukavemetli yapı özellikleri nedeniyle deprem riski yüksek bölgelerde tercih edilen yapı tipi olmuştur. Ancak, bu yapıların deprem performansını optimize etmek ve güvenliğini artırmak adına yapılan araştırmalar, sürekli olarak önemini korumaktadır.[2]

Depremler sırasında binaların ve altyapıların hasar görmesi yaygın bir durumdur. Deprem dayanıklı tasarım ve yapısal düzenlemeler, binaların ve diğer yapıların depremlere karşı daha dirençli hale getirilmesini amaçlar. Bu, güçlendirilmiş yapı elemanları, esneklik sağlayan tasarımlar, sismik izolasyon sistemleri ve yük dağılımını optimize eden stratejiler gibi çeşitli teknikleri içerebilir.[3] Deprem, birçok ülkede deprem bölgeleri olarak adlandırılan belirli bölgelerde daha sık meydana gelir. Bu bölgelerde, yapı kodları ve standartları genellikle deprem dayanıklılığını artırmak amacıyla daha sıkıdır. Deprem bölgelerinde inşa edilen yapıların, depreme dayanıklı olması, temel tasarımı ve yapı malzemeleri seçimi gibi faktörlerde önlemler alınması önemlidir.[4] Depremler doğal afetlerin en yıkıcı olanlarından biridir ve insanların güvenliği ve yapıların dayanıklılığı için ciddi tehdit oluştururlar. Depremlere karşı bilinçli bir şekilde hazırlık yapmak, depreme dayanıklı yapılar inşa etmek ve afet yönetimi önlemlerini uygulamak büyük önem taşır. Böylece, depremlerin etkileri en aza indirilebilir ve can kaybı ile hasarlar azaltılabilir. Her yapının belirli doğal frekansları vardır. Eğer deprem dalgalarının frekansı, yapının doğal frekansına yakın veya aynıysa, yapıda rezonans meydana gelir ve bu da yapıdaki hasarın artmasına neden olabilir.[5] Yapının bulunduğu zeminin özellikleri, deprem sırasındaki yapı davranışını büyük ölçüde etkileyebilir. Bunlardan sıvılaşma, yumuşak zeminlerde meydana gelen ve yapıların hasar görmesine veya çökmelerine neden olabilecek bir olgudur.[6] Yapıların depremlerde daha iyi performans göstermeleri için depreme dayanıklı tasarım prensiplerine uygun olarak tasarlanması ve inşa edilmesi gerekir. Bu prensipler, yapı norm ve yönetmeliklerinde detaylı olarak belirtilmiştir.[7] Bu sebeple, deprem ve yapı ilişkisi, yapı mühendisliği, jeoloji ve sismoloji gibi birçok bilim dalını kapsayan Disiplinlerarası kapsamlı bir konudur. Bu nedenle, deprem riski olan bölgelerde yapılacak olan yapıların, depreme dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi hayati önem taşır. Son yıllarda yaşadığımız depremler ve oluşan can kayıpları ülkemizde depreme dayanıklı yapı analizi ve tasarımı konusunu daha da önemli hale getirmiştir. Deprem konusunda yapılan akademik çalışmalar sonucunda ve bilgisayar, teknoloji, malzeme ve imalat sektöründeki gelişmelere paralel olarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik kapsamına Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesine ilişkin 7. Bölüm eklenmiş ve 06.03.2007 tarih 26454 numaralı resmî gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir (DBYBHY-2007). Bu tarihten sonra bilimsel çalışmalar, teknolojik gelişmeler, saha uygulamaları ve bu uygulamalar sonucunda kazanılan deneyimler, tecrübeler gibi birçok faktöre bağlı olarak en son 2018 yılında yeni bir deprem yönetmeliği yayınlanarak yürürlüğe girmiştir.

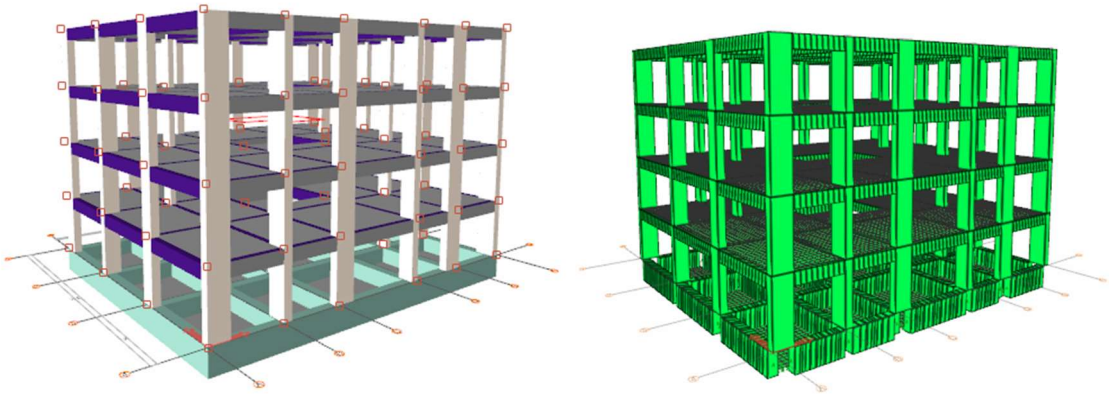
Bu çalışmada, betonarme bir yapı modelinde farklı şekillerde yerleştirilen kolonların, yapının deprem davranışına olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapının genel performansını iyileştirmek ve deprem sırasında meydana gelebilecek potansiyel hasarları en aza indirmek amacıyla projelerde kolon yerleşimlerinin 2018 deprem yönetmeliği şartlarına uygun ve doğru bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, aynı bina projesi üzerinde 3 farklı kolon yerleşimine sahip 3 ayrı bina modeli oluşturulmuş ve bu farklı kolon yerleşimlerine sahip 3 bina modeli düzensizlik sınır değeri ve moment bakımından detaylı olarak incelenmiştir. 3 farklı kolon yerleşimine sahip olan 3 bina modelinin analizleri sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmış ve kolon yerleşiminin önemi her yönü ile ortaya konularak özellikle betonarme yapı tasarım yapan, uygulayan inşaat mühendisleri ve mimarlar başta olmak üzere tasarım süreçleri ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada analizi yapılan bina Sakarya ili, Serdivan ilçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binadır. Bu betonarme binada taşıyıcı yapı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde ki farklı yerleştirilmesi durumunda binada oluşan düzensizlikler ve moment etkileri incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m uzunluğu 18 m'dir. Bina modelinin "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" ise 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla olmak üzere 6 aks bulunmaktadır. Farklı kolon yerleşimi ile oluşturulan 3 bina modelinde de kirişler 30x60 cm ve döşeme kalınlığı da 15 cm seçilmiştir. Model binalarda asansör boşluğu 180x210 cm, merdiven boşluğu da 260x340 cm olarak bırakılmıştır. Tasarlanan bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünüşü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).



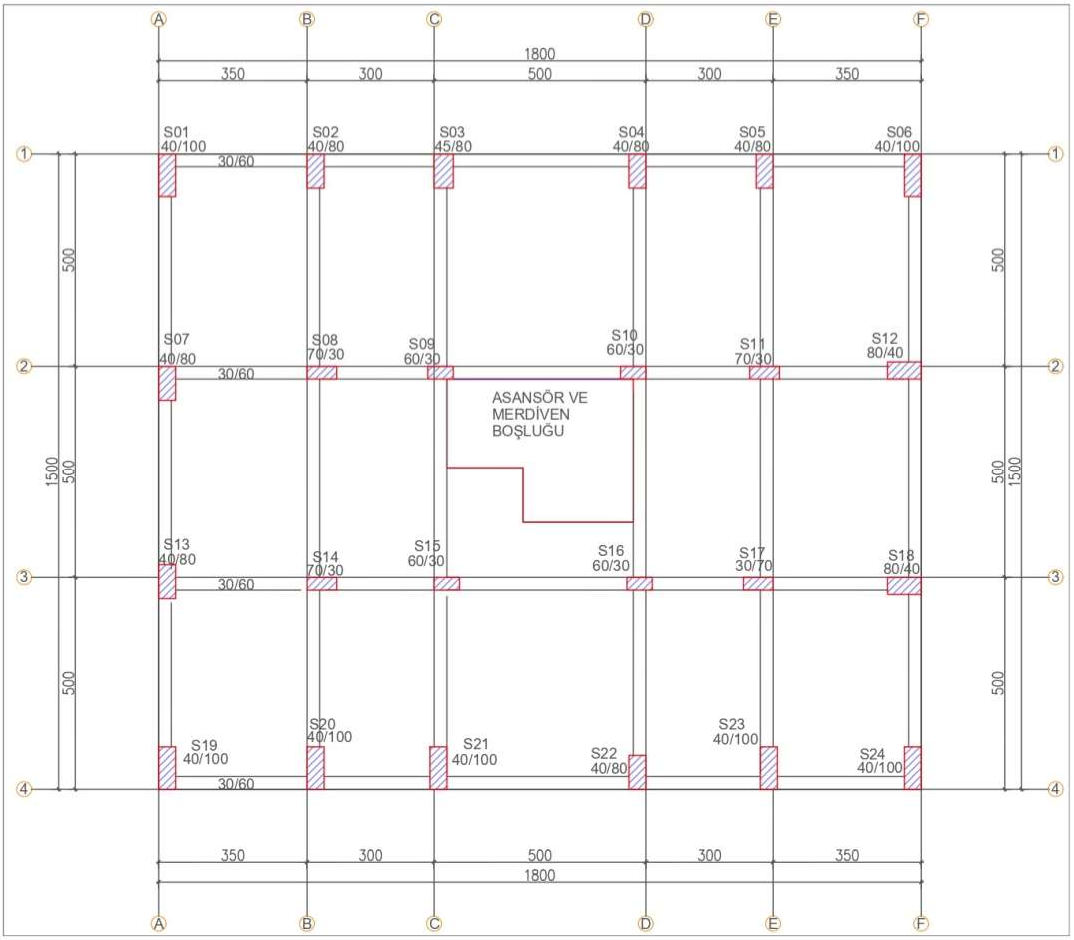
Şekil 1. Tasarlanan Bina Modelinin Kat Planı



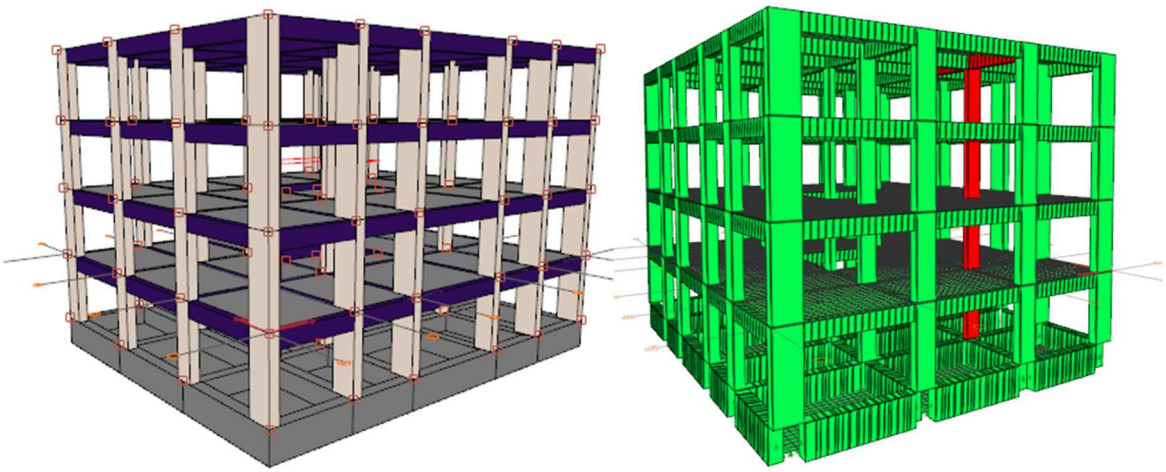
Şekil 2. Tasarlanan Bina Modelinin Katı Model ve Analiz Modeli Görselleri.

Analizler, 2018 Deprem yönetmeliğinde referans değer olarak ifade edilen Deprem yer hareketi düzeyi DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 ve tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi) ve yerel zemin ZD (orta sıkı kum yada çok katı kil tabakalarından oluşmuş zemin) esas alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, belirlenen aks aralıkları ve yönetmelik şartlarına göre Şekil 1' de planı gösterilen yapı tasarlanarak bu yapıya kolonlar yerleştirilmiştir. Mimari tasarım da referans olarak kullanılacak yapı modeli için kolonlar 2018 Deprem yönetmeliğine uygun ve binada "x" ve "y" yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde tarafımızca yönetmelik şartları ile "x ve y" yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilen kolonların olduğu bina modeli Referans model olarak alınmış, analiz edilmiş, deprem performansı ve deprem etkisi altında ki davranışları tespit edilmiştir.

Tarafımızca nizami olarak projelendirilen ve kolonları yerleştirilen bina modelinin deprem etkisi altında ki analiz sonuçlarının tamamı referans olarak alınmıştır. Bu aşamadan sonra tarafımızca oluşturulan referans proje sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek için projede tarafımızca yerleştirilen kolonların tamamı kaldırılarak sadece aksları olan 2 tane ve hiç kolon olmayan yeni modeller oluşturulmuştur. Sadece aksları olan bu iki yeni model bina planına piyasa da proje yapan bir mimar ve bir inşaat mühendisinden kolon yerleştirmeleri istenmiştir. İnşaat mühendisinin oluşturduğu modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin tamamında 24 kolon bulunmaktadır. Kolonları inşaat mühendisi tarafından yerleştirilen bina modelinin planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

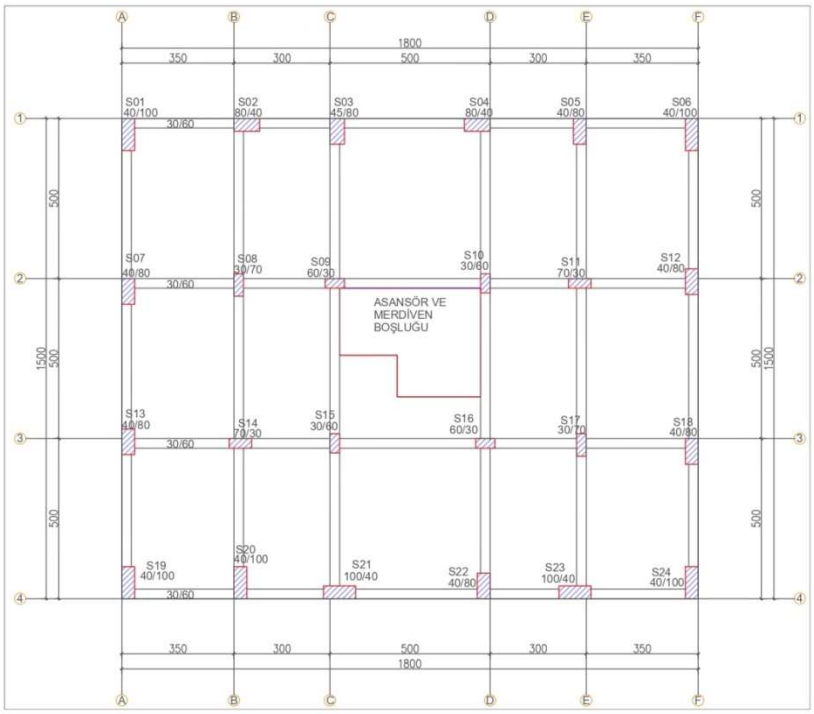


Şekil 3. 2.Modelin Kat Planı

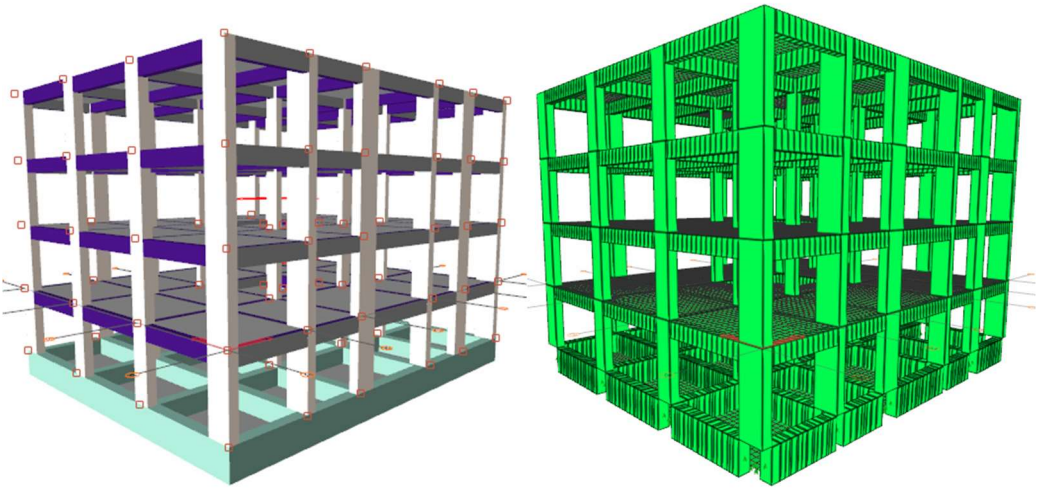


Şekil 4. Oluşturulan 2. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Sadece aksları olan ikinci model binada mimarın oluşturduğu modelde de “x” yönünde toplam 16 (yatay) ve “y” yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir. Mimar tarafından yapılan 3’ncü Model binanın planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 5. 3.Modelin Kat Planı



Şekil 6. Oluşturulan 3. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Tarafımızca nizami olarak kolon yerleşimi yapılan ve Referans olarak alınan bina modelimiz ile birbirinden bağımsız olarak kolon yerleşimi yapılan 3 farklı bina modelinde kolon yönlerinde ki değişimlerin binada oluşan düzensizlikler ve moment üzerinde ki etkileri incelenerek çok yönlü karşılaştırılmıştır. Oluşturulan bina modellerinin düzensizlikler ve moment analizleri ideCAD paket programı ile yapılmıştır.

Oluşturulan 3 bina modeli öncelikle düzensizlik sınır değerleri, “A1 burulma düzensizliği”, “A2 döşeme süreksizliği” ve “A3 planda çıkıntılar” bulunması bakımından incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. (Tablo 1).

- A1 Türü düzensizlik (Burulma düzensizliği), TBDY-2018'de birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemeye oranını ifade eden Burulma Düzensizliği Katsayısı ηbi’ nin 1.2'den büyük olması durumu olarak tanımlanmaktadır. (TBDY-2018)

$$[\eta bi = (\Delta i)max / (\Delta i)ort > 1.2]$$

Tasarım aşamasında binaların taşıyıcı sistemlerinin asimetrik tasarlanması veya deprem sırasında taşıyıcı sistem elemanlarının taşıdıkları yüklerde ön görülmeyen durumların oluşarak binanın kütle merkezinin değişmesi, Kütle merkezinin Rijitlik merkezinden uzaklaşmasına neden olur. Bu durumda depremin oluşturduğu yatay kuvvet rijitlik merkezine etki ettiğinden, yapıyı ağırlık merkezinden geçen düşey eksen etrafında döndürme eğilimi gösterir. Bu etki, düşey taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve perdelerde ön görülemeyen ve düşünülmeyen çok büyük kesit zorlanmalarına neden olmaktadır. Böyle bir bina da ise istenmeyen bir davranış olan burulma düzensizliği oluşmaktadır.

- A2 Türü düzensizlik (Döşeme düzensizliği), TBDY-2018'de şu şekilde tanımlanmıştır. Herhangi bir kattaki döşemede;

  I–Merdiven ve asansör boşlukları dâhil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3'ünden fazla olması durumu,

  II–Deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu,

  III–Döşemenin düzlem içi Rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumu (TBDY-2018)

Döşemeler düşey yükleri taşıyarak kirişler aracılığıyla düşey yük elemanlarına iletirler, yatay yükleri ise düşey yük elemanlarına dağıtır. Bu durumda kat düzlemlerinin iç yükleri etki altında kalır ve yük aktarımı diyafram davranışı yoluyla gerçekleşir. Genel olarak zeminler düzlemsel rijit olarak kabul edilir. Bu nedenle deprem anında döşemelerin işlevi deprem yüklerini düşey mesnetlere güvenli bir şekilde aktarmaktır. Döşeme rijit ise, diğer bir deyişle rijit diyafram olarak çalışıyorsa, yatay yükler altında kendi düzlemi içinde deforme olmadan rijit bir kütle gibi öteleme hareketi yapacaktır.

- A3 Türü düzensizlik (Planda Çıkıntılar Bulunması); TBDY 2018'de kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de binanın o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu olarak tanımlanmıştır. (TBDY-2018)

Yapıların plan tasarımları, yatay ve düşey yüklerin düşey taşıyıcı elemanlara iletimi konusunda büyük önem taşımaktadır. Yapıda var olan bazı çıkıntılar, döşemenin rijit diyafram davranışını olumsuz etkilemektedir. Plandaki çıkıntılar döşemelerde oluşacak ek zorlanmalar yaratacağından bu durumdan uzak durmak için döşemelerin düzenli bir geometride seçilmesi ve yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada oluşturulan bina modellerinin planlarında döşeme süreksizliği ve planda çıkıntılar düzensizlikleri bulunmamaktadır. Bu sebeple oluşturulan bina modellerinde A1 burulma düzensizliği durumları karşılaştırılmıştır. Referans bina modelinde burulma düzensizliği değerinin oldukça az olduğu buna karşın diğer iki örnek bina modelinde ise A1 burulma düzensizliği değerlerinin daha fazla olduğu görülmüş ancak 3 modelde de A1 burulma düzensizliği değerlerinin yönetmelikte tanımlanan sınır değeri aşmadığı görülmüştür (Tablo 1).

Tablo 1. Düzensizlik Sınır Değerleri

		Planda Düzensizlikler				
Model Binalar	**Katlar**	**A1***	**A2****	**A3****	**Farklar**	**% Farklar**
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	1.03 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,00	0,00
	2. Kat	1.03 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,00	0,00
	1. Kat	1.04 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,00	0,00
	Zemin Kat	1.07 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,00	0,00
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	1.06 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,03	2.912
	2. Kat	1.06 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,03	2.912
	1. Kat	1.07 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,03	2.912
	Zemin Kat	1.13 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,06	**5,607**
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	1.01 <= 1.2 yok	Yok	Yok	-0,02	-1,941
	2. Kat	1.02 <= 1.2 yok	Yok	Yok	-0,01	-0,970
	1. Kat	1.05 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,01	0,961
	Zemin Kat	1.07 <= 1.2 yok	Yok	Yok	0,00	0,000

* A1 =Burulma Düzensizliği, * A2 =Döşeme Süreksizliği, * A3 =Planda Çıkıntılar Bulunması,

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile A1 Düzensizlik Sınır Değerleri için %5,607 oranına kadar bir artış olduğu ve bu artışın dikkate alınması gereken bir değer olduğu görülmüştür. Özellikle simetrik olmayan, kütle merkezi ve Rijitlik merkezi arasında çok fark olabilecek projeler bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan

ve sık sık hem büyük hem de küçük depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan 3 bina modeli düşey yönde düzensizlikler olan, "B1 Zayıf Kat Düzensizliği", "B2 Yumuşak Kat Düzensizliği" ve "B3 Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği" bakımından da incelenmiştir.

- B1 Türü düzensizlik (zayıf kat düzensizliği); TBDY-2018'de komşu katlar arası dayanım düzensizliği olup betonarme binalarda birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki etkili kesme alanının, bir üst kattaki etkili kesme alanına oranı olarak tanımlanan dayanım düzensizliği katsayısı ηci 'nin 0.80'den küçük olması durumu olarak tanımlanmıştır. (TBDY-2018)

Ülkemizdeki yapılan yapılarda, genellikle zemin kata ait dolgu duvarlar ticari amaçla yıkılmaktadır. Üst katlarda ise genellikle konut kullanımından dolayı duvar alanı zemin kata kıyasla daha fazla olmaktadır. Bunun sonucu olarak zemin kat üst katlardan daha az kesme alanına sahip olmakta ve zayıf kat etkisi meydana gelebilmektedir.

- B2 Türü düzensizlik (Yumuşak Kat Düzensizliği); Herhangi bir kattaki göreli kat ötelemesinin belirli sınırlar içerisinde olması ve komşu katlardaki göreli kat ötelemesine oranının, deprem etkisinin güvenli bir şekilde taşınabilmesi için belirli bir değeri aşmaması gerekmektedir. (TBDY-2018). Bu durum TBDY-2018'de, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'inci kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan Rijitlik Düzensizliği Katsayısı ηki'nin 2.0'den fazla olması durumu olarak tanımlanmıştır.

  $[\Delta ki = (\Delta i/hi)ort / (\Delta i+1/hi+1)ort > 2.0]$ veya $[\eta ki = (\Delta i/hi)ort / (\Delta i-1/hi-1)ort > 2.0]$

- B3 Türü düzensizlik (Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği); TBDY-2018 'de, taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının (kolon veya perdelerin) bazı katlarda kaldırılarak kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumu olarak tanımlanmıştır. (TBDY-2018)

Tarafımızca oluşturulan Referans bina modeli ile inşaat mühendisi ve mimar tarafından oluşturulan model binalarda meydana gelen düşey düzensizlikler belirlenmiş ve sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Düzensizlik Sınır Değerleri

		Düşey Düzensizlikler				
Model Binalar	**Katlar**	**B1***	**B2****	**B3****	**Farklar**	**% Farklar**
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	1.00>= 0.8 yok	0.71 <= 2 yok	Yok	0,00	0,00
	2. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.46 <= 2 Yok	Yok	0,00	0,00
	1. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.49 <= 2 Yok	Yok	0,00	0,00
	Zemin Kat	1.00>= 0.8 yok	0.70 <= 2 Yok	Yok	0,00	0,00
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	1.00>= 0.8 yok	0.78 <= 2 Yok	Yok	0,07	9.86
	2. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.62 <= 2 Yok	Yok	0,16	10.96
	1. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.46 <= 2 Yok	Yok	-0,03	-2,01
	Zemin Kat	1.00>= 0.8 yok	0.74 <= 2 Yok	Yok	0,04	5.71
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	1.00>= 0.8 yok	0.74 <= 2 yok	Yok	0,03	4.23
	2. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.58 <= 2 Yok	Yok	0,12	8.22
	1. Kat	1.00>= 0.8 yok	1.50 <= 2 Yok	Yok	0,01	0.67
	Zemin Kat	1.00>= 0.8 yok	0.70 <= 2 Yok	Yok	0,00	0.00

* B1 = Zayıf kat düzensizliği, * B2 = Yumuşak Kat Düzensizliği,
*B3 = Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği,

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile düşey düzensizliklerden olan B2 Yumuşak Kat Düzensizliğinin %10,96 oranına kadar artabildiği görülmüştür. Binalarda ki kat yüksekliklerinin farklı olması, projenin simetrik olmaması, kolon kesitlerinin katlar arasında farklılık göstermesi durumlarında Yumuşak Kat düzensizliğinin çok daha büyük oranlarda artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ve sık sık depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların oldukça önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan planlarda B1 zayıf kat düzensizliği bulunmamaktadır çünkü oluşturulan planlarda ki kolonlar tüm katlarda sürekliliğini koruyarak devam etmekte olup tüm katlarda etkili kesme alanlarında yönetmeliğe aykırı bir durum bulunmamaktadır. Diğer taraftan, B3 taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği ile ilgili bir durum da söz konusu olmadığı için model binalarda B3 düzensizliği bulunmamaktadır. Bu durumda oluşturulan bina modellerinde düşey düzensizlikler den olan B1 zayıf kat düzensizliği ve B3 taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği düzensizlikleri bulunmamaktadır.
Oluşturulan bina modellerinde düşey yönde ki düzensizlik durumlarından B2 türü düzensizlik (Yumuşak Kat Düzensizliği) bakımından farklar oluşmuştur. Referans bina modelinde yumuşak kat düzensizliği değerinin diğer modellere kıyasla az olduğu buna karşın diğer iki örnek bina modelinde ise B2 yumuşak kat düzensizliği değerinin daha fazla olduğu görülmüş ancak 3 modelde de B2 yumuşak kat düzensizliği değerinin sınır değeri aşmadığı görülmüştür.

Referans bina modeli ve oluşturulan diğer iki bina modellerinde meydana gelen Devrilme Momentleri arasında fark olup olmadığı da incelenmiştir. Yapıyı devirme çalışan devrilme momenti, yapıyı devirici momentlerin toplamının yapının devrilmesini önleyen momentlerin toplamına oranını olarak ifade edilebilir. Yapıyı devirmeye çalışan momentler ile yapının devrilmesini önleyen momentlerin oranının 0.5'den büyük olması gerekmektedir ve bu durum kontrol edilmelidir. Yapıya etki edecek momentler için "x" ve "y" yönleri için ayrı ayrı olmak üzere $\sum M_{devirici} / \sum M_{koruyucu} > 0.5$ 'in sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir. Referans bina modeli ve diğer iki bina modelinin Deprem momentleri ve düşey yük momentleri "x" ve "y" yönleri için hesaplanmış ve sonuçlar aşağıda ki tablolarda gösterilmiştir (Tablo 3 ve Tablo 4).

Tablo 3. Yapıyı Devirmeye Çalışan Deprem Momentleri "$M_{devirici}$"

Model Binalar	Katlar	H (m)*	Fx (tf)*	Fy (tf)*	Mx (tfm)*	My (tfm)*
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	12.00	76.57	71.78	918.90	861.38
	2. Kat	9.00	69.21	64.88	622.89	583.90
	1. Kat	6.00	46.14	43.25	276.84	259.51
	Zemin Kat	3.00	23.07	21.63	69.21	64.88
	Toplam				**1887.85**	**1769.67**
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	12.00	76.68	66.91	920.19	802.95
	2. Kat	9.00	69.31	60.48	623.77	544.29
	1. Kat	6.00	46.21	40.32	277.23	241.91
	Zemin Kat	3.00	23.10	20.16	69.31	60.48
	Toplam				**1890.51**	**1649.63**
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	12.00	77.52	75.16	930.29	901.97
	2. Kat	9.00	70.07	67.94	630.61	611.42
	1. Kat	6.00	46.71	45.29	280.27	271.74
	Zemin Kat	3.00	23.36	22.65	70.07	67.94
	Toplam				**1911.24**	**1853.07**

* h = binanın i. Katının temel üzerinden itibaren ölçülen yüksekliği,
* Fx = Kullanılan yönteme göre hesaplanan i. Kata ait X yönü deprem kuvveti,
* Fy = Kullanılan yönteme göre hesaplanan i. Kata ait Y yönü deprem kuvveti,
*Mx =Deprem Yüklemelerinden dolayı oluşan X yönü için moment,
*My =Deprem Yüklemelerinden dolayı oluşan Y yönü için moment,

Tablo 4. Yapının Devrilmesini Önleyen Düşey Yük Momentleri "$M_{koruyucu}$"

Model Binalar	Katlar	Kat Ağırlığı (tf)*	Dx (m)*	Dy (m)*	Mx (tfm)*	My (tfm)*
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	246.12	9.00	7.47	2214.21	1839.40
	2. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.62	2410.86
	1. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.62	2410.86
	Zemin Kat	791.13	8.99	7.44	7112.14	5888.95
	Toplam				**15149.60**	**12225.07**
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	246.12	9.00	7.47	2214.00	1839.53
	2. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.29	2411.09
	1. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.29	2411.09
	Zemin Kat	790.98	8.99	7.44	7110.00	5888.38
	Toplam				**15146.59**	**12250.09**
3. Model (Mimar tarafından	3. Kat	246.12	9.00	7.47	2214.21	1839.06
	2. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.64	2410.32
	1. Kat	323.88	8.99	7.44	2911.64	2410.32

hazırlanan)	Zemin Kat **Toplam**	791.13	8.99	7.44	7112.17 **15149.65**	5887.62 **12547.33**

* dx,dy= Katın moment alınan noktaya göre kütle merkezi koordinatları
*Mx =Deprem Yüklemelerinden dolayı oluşan X yönü için moment,
*My =Deprem Yüklemelerinden dolayı oluşan Y yönü için moment

Oluşturulan planlarda Yapı Devrilme Momenti kontrolü her bina için Tablo 3 ve Tablo 4'de ki veriler kullanılarak yapılmış olup 3 bina model için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. X ve Y yönü için Devrilme kontrolü

Model Binalar	**X YÖNÜ İÇİN**	**Fark**	**% Fark**	**Y YÖNÜ İÇİN**	**Fark**	**% Fark**
1.Referans Model	1887.85/15149.60 = 0.125 < 0.5	0,00	0,00	1769.67/12550.07 = 0.141 < 0.5	0,00	0,00
2. Model	1890.51/15146.59 =0.125 < 0.5	0,00	0,00	1649.63/12550.09 = 0.131 < 0.5	-0.010	-7.09
3. Model	1911.24 / 15149.65 = 0.126 < 0.5	0,001	0,80	1853.07/12547.33 = 0.148 < 0.5	0.007	4.96

Tablo da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen sadece kolonların farklı yerleştirilmesi ile X ve Y yönü için Devrilme momentlerinde oluşan farkın yaklaşık %5 oranlarına kadar çıkabildiği görülmüştür. Simetrik olmayan, kat adedi ve kat yükseklikleri farklı olan, inşaat projelerinde ve özellikle çok katlı binalarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ve sık sık depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin+3 katlı bir binada farklı kolon yerleşimi yapılan 3 ayrı bina modeli oluşturularak bu model binaların TBDY-2018 yönetmeliğinde belirtilen esaslara göre İdeCAD programı ile performans analizleri yapılmış ve bu 3 model binanın deprem etkisi altında ki davranışları incelenerek karşılaştırılmıştır. Analiz ve değerlendirmeler sonucunda yatay deprem yüklerine maruz kalan kolon ve perde duvar gibi düşey taşıyıcı elemanlar planda x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilirse yapı depreme karşı x veya y yönlerinde aynı davranışı gösterecek ve yapı üzerinde ki deprem etkileri azalacaktır. Ancak bina tasarlanan binalarda yerleştirilen kolon ve perde duvarlar x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmezlerse deprem etkileri binanın Rijitliğinin az olduğu doğrultuda çok büyük hasarlara ve göçmelere neden olacaktır. Oluşturulan referans modelde x ve y doğrultusunda kolonlar eşit olarak yerleştirilmiştir. 2. modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin tamamında 24 kolon bulunmaktadır. 3.modelde de "x" yönünde toplam 16 (yatay) ve "y" yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarından; düzensizlik sınır değeri ve moment bakımından modeller karşılaştırıldığında alınan sonuçlar arasından tüm modellerin uygun olduğu görülmüştür. Ancak her ne kadar bu 3 bina modeli düzensizlik sınır değeri ve moment bakımından uygun sonuçlar verse de kolon yerleşimlerinin farklı olması incelenen parametreler açısından birbiri arasında farklılıklar oluşmasına neden olmuştur.

- A1 Türü düzensizlik (Burulma düzensizliği), bakımından 3 model karşılaştırıldığında burulma Düzensizliği Katsayısı ηbi' nin 1.2'den büyük olan bir model bulunmamaktadır. Fakat analiz sonuçlarına göre binaların mimari tasarımı ve çizimi çizim safhasında kolonların mimar ve mühendisler tarafından doğru yerleştirilmesi durumunda düzensizlik kat sayısının azaldığı görülmüştür. Referans modelde 1. Kat değeri 1.04 iken, 2.modelde de bu kat sayı 1.07 ve 3. modelde 1.05 olmuştur.
- A2 Türü düzensizlik (Döşeme düzensizliği) ve A3 Türü düzensizlikler (Planda Çıkıntılar Bulunması) oluşturulan bina modellerinde bulunmamaktadır.

Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile A1 Düzensizlik Sınır Değerleri için %5,607 oranına kadar bir artış olduğu ve bu artışın dikkate alınması gereken bir değer olduğu görülmüştür. Özellikle simetrik olmayan, kütle merkezi ve Rijitlik merkezi arasında çok fark olabilecek projeler bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır.

- B1 Türü düzensizlik (Zayıf Kat Düzensizliği) ve B3 Türü düzensizlik (Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği) oluşturulan bina modellerinde bulunmamaktadır.

- B2 Türü düzensizlik (Yumuşak Kat Düzensizliği) Rijitlik Düzensizliği Katsayısı ηki'nin 2.0'den fazla olması durumu olarak tanımlanmıştır. İncelenen bu 3 modelde de B2 Türü düzensizlik (Yumuşak Kat Düzensizliği)'de bulunmamaktadır. Fakat analiz sonucu alınan değerler bu değişiklik göstermektedir. Referans modelin üçüncü katında oluşan Rijitlik Düzensizliği Katsayısı 0.71 iken 2.modelde bu kat sayı 0.78 ve 3. modelde 0.74 olmuştur.

Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile düşey düzensizliklerden olan B2 Yumuşak Kat Düzensizliğinin yaklaşık %11 oranına kadar artabildiği görülmüştür. Binalarda ki kat yüksekliklerinin farklı olması, projenin simetrik olmaması, kolon kesitlerinin katlar arasında farklılık göstermesi durumlarında Yumuşak Kat düzensizliğinin çok daha büyük oranlarda artabileceği dikkate alınmalıdır. Bu analiz sonucunda kolonların mimar ve mühendisler tarafından doğru yerleştirilmesi durumunda Yumuşak Kat Düzensizliği değerinin azaldığı görülmüştür.

- Yapı Devrilme Momenti kontrolü, üç modelinde ∑M devirici /∑M koruyucu> 0.5 denklemini sağladığı ve 0.5'den küçük olduğu görülmüştür. Fakat referans modelde X yönü için 0.125 ve Y yönünde 0.141 iken 2.modelde X yönü için 0.125 ve Y yönünde 0.131, 3.modelde X yönü için 0.126 ve Y yönünde 0.148 çıkmıştır.

Aynı proje olmasına rağmen sadece kolonların farklı yerleştirilmesi ile X ve Y yönü için Devrilme momentlerinde oluşan farkın yaklaşık %5 oranlarına kadar çıkabildiği görülmüştür. Simetrik olmayan, kat adedi ve kat yükseklikleri farklı olan, inşaat projelerinde ve özellikle çok katlı binalarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Analiz sonucunda kolonların mimar ve mühendisler tarafından doğru yerleştirilmesi durumunda Yapı Devrilme Momentinin azaldığı görülmüştür.

IV. TARTIŞMA

Tüm bu analiz sonuçlarına bakıldığında modellerin hepsi kritik değerlerin altında kalsalar dahi binaların mimari tasarımı ve çizimi safhasında kolonların doğru yerleştirilmesi durumunda Binada Oluşan Düzensizlikler ve Moment Etkilerini oldukça azaltmak mümkündür.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı Türkiye gibi deprem kuşağında bulunan bir ülke için çok önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, aynı plan üzerinde farklı yönlerde ve boyutlarda yerleştirilen kolonların bina üzerinde ki düzensizlik sınır değeri ve moment bakımından etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bina tasarımı yapan mimar veya inşaat mühendislerinin tasarımda yerleştirdikleri kolonların binanın düzensizlik sınır değeri ve moment bakımından bina üzerinde ki etkilerini nasıl değiştirdiği, oluşturulan 3 bina modelinin ideCAD programı ile analiz edilmesi sonucunda ortaya konulmuştur.

V. ÇIKARIM

Bu sonuçlara göre binaların mimari tasarımı ve çizimi safhasında kolonların mimar ve mühendisler tarafından doğru yerleştirilmesi durumunda düzensizlik sınır değeri ve moment etkisinin azaldığı gösterilmiştir. Bu sayede taşıyıcı sistem tasarımında kolon yerleşiminin doğru yapılması, tasarım safhasında ki hatalarını en aza indirilmesi ile deprem açısından daha güvenilir, depreme daha dayanıklı yapılar tasarlanabileceği, böylece deprem risklerinin azaltılarak can ve mal güvenliğinin sağlanabileceği, aynı şekilde ekonomik kayıpların azaltılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Alkan, Abdullah. Çok katlı konut yapılarında kullanıcıya özelbir planlama denemesi (Panoroma apartmanı örneği). MS thesis. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, 2019.

[2] Varol, K. O. Ç. "Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi." Çanakkale onsekiz mart üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi 2.1 (2016): 36-57.

[3] Albakour, Amr & Ipek, Cengiz. (2023). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı.

[4] Bikçe, M. (2017). Taken and Need to Take Precautions in Turkey's Earthquakes . International Journal of Engineering Research and Development , 9 (2) , 24-31 . DOI: 10.29137/umagd.351464

[5] Cevher, M. , Keçeli, A. "Zemin Hakim Periyodu ve Bina Yüksekliği Rezonans İlişkisi" . Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi 17 (2018): 203-224 https://dergipark.org.tr/tr/pub/uybd/issue/41586/463982

[6] Alpaslan, N. (2013). Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması . Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi , 3 (2) , 67-89 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/buyasambid/issue/29820/320770

[7] Şimşek Şengül, Ü. (2023). Deprem Etkisi Altında Yapıların Yatay Ve Düşey Doğrultudaki Düzensizliklerinin İncelenmesi . TÜRKAV Kamu Yönetimi Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi , 3 (4) , 215-231 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkav/issue/77993/1283428

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

3 Boyutlu Yazıcılarda Topoloji ve Kafes Optimizasyonu ile Bölgesel Yoğunluk Özelleştirme Çalışması

Mert GÜLEN[a,b], Selçuk KARAGÖZ[a], Berkant UYSAL[b]*

[a] Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa/Türkiye.
[b] Tofaş Türk Otomobil Fabrikası Arge Merkezi, Bursa/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar: mert.gulen@tofas.com.tr**

ÖZET

Geleneksel üretim yöntemlerinin bazı durumlarda yetersiz kaldığı gözlemlenirken, Endüstri 4.0 ve diğer teknolojik ilerlemelerle birlikte eklemeli imalat yöntemleri önem kazanmıştır. Bu yöntemler, havacılık, biyomedikal, otomotiv ve inşaat gibi endüstrilerde ihtiyaçları karşılamak için kullanılmaktadır. FDM (eriyik yığma) yöntemi, özellikle ev kullanıcıları arasında popüler olan bir teknolojidir ve iç yapı yoğunluğunu tüm hacimde etkileyerek değiştirme imkanı sunar. Bu bildiri çalışmasında, FDM yöntemiyle üretilen parçaların dış yüzeyini değiştirmeden iç yapısını iyileştirme ve özelleştirme hedeflenmiştir. Topoloji ve kafes optimizasyonu kullanılarak iç yapıyı değiştirmek amaçlanmıştır.
araç kapı açma kolundan elde edilen model üzerinde yapılan analizler sonucunda en iyi optimizasyonu sağlayan bir topoloji optimizasyonu, bir kafes optimizasyonu ve bir hibrit model oluşturulmuştur. Bu sonuçlar, iç yapı yoğunluğunu özelleştirmek için üretilmiştir. Modeller, PLA malzemesi kullanılarak Bambu Lab X1-Carbon 3 boyutlu yazıcıyla üretilmiştir.
Hangi modelin en iyi kuvvet / ağırlık oranına sahip olduğunu gözlemleyebilmek için fiziki olarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler ve analizler neticesinde topoloji optimizasyonu ile üretilen model en iyi kuvvet / ağırlık oranına sahip olduğu ve tam dolu parçaya göre %32 daha avantajlı olduğu görülürken ardından kafes optimizasyonu %22 ve hibrit optimizasyon %20 ile takip etmiştir.

Anahtar Kelimeler: *3B yazıcı, eklemeli imalat, FDM, kafes optimizasyonu, topoloji optimizasyonu.*

A Study on Regional Density Customization Using Topology and Lattice Optimization in 3D Printers

ABSTRACT

While traditional manufacturing methods have proven insufficient in certain cases, additive manufacturing methods have gained significance with the advent of Industry 4.0 and other technological advancements. These methods are used to meet the needs of industries such as aviation, biomedical, automotive, and construction. The Fused Deposition Modeling (FDM) method, particularly popular among home users, allows for the alteration of internal structure density throughout the volume. This paper aims to improve and customize the internal structure of parts produced using the FDM method without altering their external surface. Topology and lattice optimization are used to modify the internal structure.

Based on analyses conducted on a model obtained from the vehicle door handle, topology optimization, lattice optimization, and hybrid model have been developed to achieve the best optimization results. These results were produced to customize the internal structure density. The models were produced using PLA material and the Bambu Lab X1-Carbon 3D printer.

Physical tensile tests were performed to observe which model had the best force/weight ratio. As a result of, the model produced with topology optimization has the best force/weight ratio and is 32% more advantageous than the full-filled part, followed by lattice optimization 22% And hybrid optimization followed with 20%.

Keywords: *3D printing, additive manufacturing, FDM, lattice optimization, topology optimization.*

I. GİRİŞ

Eklemeli İmalat Yöntemi olarak bilinen katkı maddesi ile üretim, malzeme katmanlarını art arda ekleyerek 3 boyutlu nesneler oluşturmak için kullanılan bir teknolojidir. 3B baskı, geleneksel işleme yöntemlerinin aksine daha verimlidir ve ekonomik olarak da farklı bir alternatif sağlar. Eklemeli imalat bir çok sektörün ihtiyaçlarına karşılık vermektedir Bu yöntem, karmaşık uygulamalar için spesifik olarak tasarlanmış parçaların üretiminde etkin olarak kullanılabilir ve kullanışlı bir yöntem olarak ortaya çıkar ve eğer parçaların ihtiyaca göre revize edilmesi gerekiyorsa bu yöntemin oldukça elverişli olduğunu görebiliriz. Bilgisayar destekli tasarım (Computer-aided design 'CAD'), çoğunlukla 3B baskı için parça modellerinin oluşturulmasında kullanılır ve bu parçaların yazıcı tarafından üretilebilir olması için bir dizi komut içeren kodlara dönüştürülür. 3B baskı için çeşitli teknikler mevcuttur ve seçilen teknik, bütçe, malzeme, görünüm ve mekanik özellikler gibi seçim parametrelerine bağlıdır.Gelişen üretim teknolojileriyle birlikte zaman içinde birçok eklemeli imalat yöntemi de geliştirilmiştir. Stereolitografi (SLA), Elektron Işın erime (EBM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve eriyik yığma modellemesi (FDM) gibi 3B baskı teknikleri örnek verilebilir. Bu teknikler arasında, özellikle eriyik yığma modellemesi anlamına gelen FDM oldukça popülerdir. Popüler olmasını sağlayan kriterler kullanımının kolay ve maliyetinin düşük olması, ek olarak imalat süresini %85 e kadar kısaltabiliyor olması olarak gösterilebilir.Bu yüzden prototip parçaların üretiminde sıkça tercih edilir. Ayrıca, FDM bu avantajlar sayesinde, endüstriyel, akademik ve ev kullanımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 3B baskı, üretim sürecinde talaşlı imalat ve enjeksiyon kalıplama gibi klasik üretim yöntemlerine göre zaman açısından verimli ve düşük üretim miktarlarında uygun maliyetli bir alternatif sağlar[1].

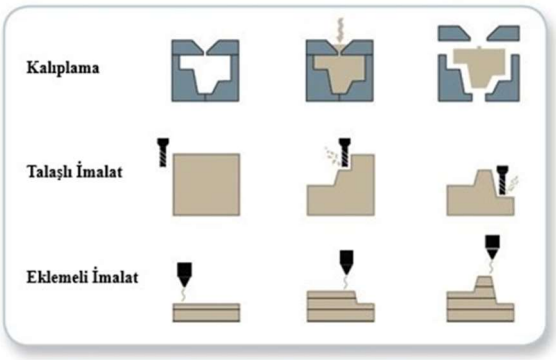
Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla birçok önemli avantaja sahiptir:

1. Model Karmaşıklığı: Eklemeli imalatta, modelin karmaşıklığı üretim maliyetini önemli ölçüde etkilemez. Klasik üretim yöntemlerinde, modelin karmaşıklığı arttıkça üretim süreci zorlaşır ve maliyet artar. Hatta bazı karmaşık modeller geleneksel yöntemlerle üretilemeyebilir veya tasarımın basitleştirilmesi gerekebilir. Eklemeli imalat ise modelin karmaşıklığından bağımsız olarak istenen sonucu elde etmeyi mümkün kılar.
2. Düşük İlk Yatırım: Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük bir ilk yatırım gerektirir. Sadece 3B yazıcı ve uygun malzemeler ile üretime başlamak mümkündür. Kalıplar, özel aletler ve diğer pahalı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaz.
3. Özelleştirme ve Değişiklik Kolaylığı: Eklemeli imalat, üretim sürecinde kolayca özelleştirme ve değişiklik yapma imkanı sunar. Seri üretimlerde modelde değişiklik yapmak oldukça pahalı ve zorlayıcı olabilir. Eklemeli imalatta ise model üzerinde kolayca değişiklikler yapılabilir ve özelleştirilmiş ürünler üretilebilir.
4. Hızlı Prototipleme: Eklemeli imalat, prototipleme için ideal bir yöntemdir. Klasik yöntemlerle prototip üretimi aylar sürebilirken, 3B baskı ile prototipler birkaç gün içinde üretilebilir. Bu da ürün geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırır.

Eklemeli imalatın bazı dezavantajları da mevcuttur:

1. Daha Düşük Dayanıklılık: Eklemeli imalatla üretilen ürünler, katmanlı yapıları nedeniyle klasik üretim yöntemleriyle üretilen ürünlere göre daha düşük dayanıma sahip olabilir. Özellikle katmanların birleşim yerleri, kuvvetlere karşı daha zayıf olabilir.
2. Geometri Hassasiyeti: Eklemeli imalat teknolojisi gelişse de, katmanlı yapıdan dolayı geometri toleransları klasik üretim yöntemleri kadar hassas değildir.
3. Destek Malzemesi Kullanımı: Karmaşık modellerde, bazı noktalara malzeme ekleyebilmek için destek malzemesi kullanılması gerekebilir. Bu durumda, üretimden sonra destek malzemesinin temizlenmesi gerekir.
4. Üretim Miktarına Göre Maliyet: Düşük üretim miktarlarında eklemeli imalat daha uygun maliyetli olabilir. Ancak üretim miktarı arttıkça, geleneksel üretim yöntemleri daha düşük maliyetli hale gelir.

Eklemeli imalat, birçok önemli avantaja sahip bir üretim yöntemidir. Özellikle karmaşık modellerin üretimi, prototipleme ve düşük üretim miktarlarında ideal bir çözümdür. Ancak, bazı dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır. Üretim yönteminin seçimi, üretilecek modelin karmaşıklığı, dayanıklılık gereksinimleri, üretim miktarı ve maliyet gibi birçok faktöre bağlı olarak yapılmalıdır.

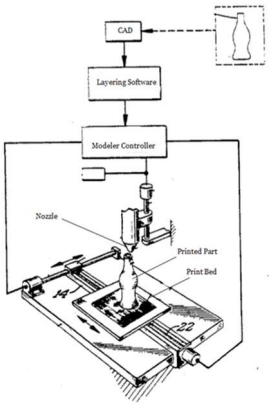


Şekil 1.1: Üretim yöntemleri şeması [2]

A. Literatür Araştırması

Üç boyutlu baskı (3B baskı) kavramı ilk olarak 1974 yılında David E. H. Jones [3] tarafından ortaya atılmıştır. Jones, New Scientist dergisindeki köşesi Ariadne'de, katman katman malzeme biriktirerek üç boyutlu nesneler üretme fikrini sunmuştur.1983 yılında Chuck Hull[4], bir firmada çalışırken karşılaştığı bir teknolojiyi üç boyutlu çizilmiş objeleri katı objelere dönüştürmek için kullanabileceğini düşünmüştür. Bu fikirden yola çıkarak stereolitografi (SLA) yöntemini icat etmiştir. SLA, bir lazer kaynağının sıvı haldeki reçine malzemesine ışın göndererek katılaştırması işlemidir. Bu sayede, dijital bir modelin üç boyutlu bir kopyası üretilebilmektedir. Chuck Hull[4], 1987 yılında patentiyle birlikte şirketi 3D Systems Corporation'ı kurarak SLA-1 modelini piyasaya sürdü, bu da ilk ticari 3D yazıcıydı.

Diğer yandan, Scott Crump[5], 1989 yılında Fused Deposition Modeling (FDM) adını verdiği teknolojiyi geliştirdi. Bu teknoloji, termoplastik malzemeyi eriterek ve katman katman bir araya getirerek çalışır. Bugün en yaygın kullanılan 3D baskı teknolojilerinden biridir ve ABS ve PLA gibi birçok termoplastik malzeme kullanılarak çalışır. FDM baskı sırasında genellikle sökülebilir destek malzemesi kullanımı gerekebilir. Şekil 1.2'de 'Apparatus and method for creating three-dimensional objects' isimli patentinden orijinal çizimini gösterilmiştir.

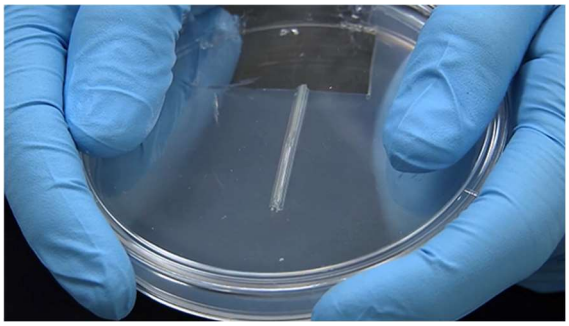


Şekil 1.2 : Scott Crump patent çizimi [6]

MIT (Massachusetts Institute of Technology) [7], 1993 yılında "3DP" adını verdiği üç boyutlu baskı teknolojisini icat etmiştir. Bu teknoloji ile çalışan yazıcı, seramik malzemeden oluşan toz parçalarının jet sistemi ile püskürtülerek katman katman bir araya getirilmesiyle katılaşmasını sağlar. Bu sistem, SLS sistemindeki gibi destek malzemesine ihtiyaç duymaz ve üretilen parça, baskı sırasında içinde bulunduğu toz granüller arasında desteklenir. MIT, bu teknolojinin lisansını birçok firmaya satmıştır.

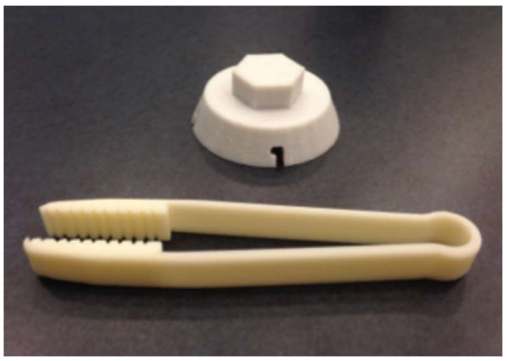
Stratasys adlı firma[8], 2000 yılında düşük fiyatla piyasaya sürülen ve ABS malzemeden ürünler veren FDM tipi teknolojiyle çalışan "Prodigy" adlı üç boyutlu yazıcıyı geliştirmiştir. 2002'nin mart ayında ise bir üst model olan Prodigy Plus'ı piyasaya süren ekip, sisteme suda çözünebilen destek malzemesi özelliğini de eklemiştir. RepRap projesi kapsamında[9], 2008 yılında Darwin adında açık kaynak kodlu bir üç boyutlu yazıcı üretilmiştir. Darwin, kendi parçalarının %50'sini üretebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Organovo ve Invetech tarafından[10], 2009 yılında geliştirilen bir 3B biyo-yazıcı ile önemli bir gelişme kaydedilmiş ve ilk biyobaskılanmış kan damarı üretilmiştir. Şekil 1.3'de bu prototip gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : 3B yazıcı ile üretilmiş kan damarı [11]

NASA[12], 2014 yılında uzay istasyonunda 3B yazıcı kullandıklarını ve ilk ürünlerini ürettiklerini açıkladı. Şekil 1.5'te, bu yöntemle üretilen ve NASA tarafından kullanılan bazı ürünler gösterilmiştir.



Şekil 1.5: NASA tarafından üretilen 3B yazıcı ile üretilmiş ürünler [12]

Yurt dışında birçok marka kendi üç boyutlu yazıcılarını üretirken, Türkiye pazarında da bu teknolojiye girişim yapan firmalar oluşmaya başlamıştır. Zaxe[13], 2015 yılında yerli ve milli 3B yazıcı üretmek hayali ile Baki Gezgen ve Aydonat Atasever tarafından kuruldu. İkili, Zaxe markası ile ilk ürünleri X1'i 2016 yılında piyasaya çıkarmayı başardı. Bu model hali hazırda 400'den fazla eğitim kurumunda kullanılmaktadır. Zaxe, 2017 yılında Keiretsu Melek Yatırımcı grubundan aldığı destek ile üretim ve Ar-Ge çalışmalarına hız vermiş, yeni modelleri ile eğitim kurumlarına ek olarak, Kobi ve sanayi kuruluşlarına uygun Z serisi modellerini satışa sundu. Zaxe X1 ve Z1 modeli Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Zaxe X1 ve Z1 modeli [13]

B. Çalışmanın Amacı

Eklemeli imalat yönteminin avantajları ve dezavantajları daha önce bahsedilmişti. 3B nesnenin iç yapısı, dış tasarımı destekleyen örgü yapılardan oluşmaktadır. Bu örgü yapılar bal peteği, üçgen, elmas gibi çeşitli şekillerde olabilir. Aynı zamanda yapı içindeki yoğunluklarına da müdahale edebiliriz. Bu yoğunluk oranı doğrudan kuvvet ve ağırlığı da etkiler. Örnek olarak %20 yoğunlukta üretildiği zaman iç yapı boşluklu olacaktır. Ağırlığı düşük olacaktır ancak kuvvete maruz kaldığından kolaylıkla deforme olabilir. Aksi durumda %100 yoğunlukta üretildiğinde ise ağırlığı ve kuvvet direnci de artacaktır.

Bu noktada optimum bir sonuç elde edebilmek için, diğer bir deyişle kuvvet/ağırlık oranını maksimumda tutabilmek çalışmanın konusudur. Analizler ile modelin kuvvet gelen ve stres altında kalan yerleri tespit ederek, sadece bu alanların iç yapı yoğunluğunu arttırılması amaçlanmaktadır. Bu sayede düşük ağırlıkta üretilmek istenen model, mukavemetinden feragat edilmeden üretilebilecektir. Aynı zamanda eklemeli imalat yöntemini geleneksel üretim yönlerinden ayıran katman katman üretilmesi ile dış tasarım değişmeden iç yapıya müdahale edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece hem istenen tasarımda hem de optimum kuvvet/ağırlık oranında model üretilebilecektir.

II. MATERYAL METOT

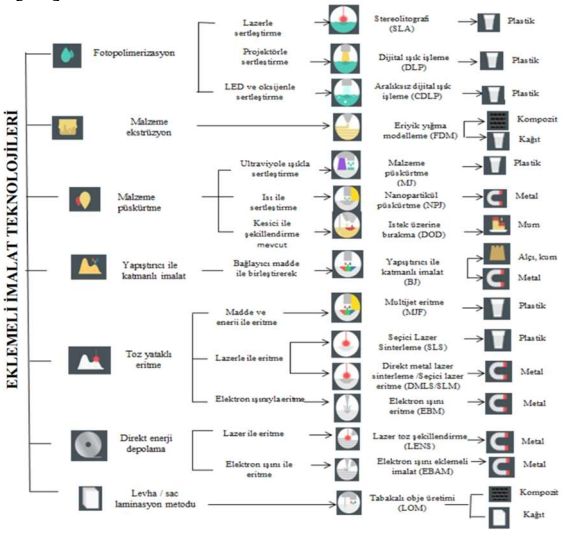
A. *Eklemeli İmalat*

Eklemeli imalat, üretim süreci olarak bilinen ve genellikle 3B baskı olarak adlandırılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, üç boyutlu şekil verileri kullanılarak malzeme katman katman eklenerek ürün elde edilir. Model genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile çizilen veya tersine mühendislik gibi farklı yöntemlerle elde edilen bir 3 boyutlu modelden üretilir. Bu model daha sonra bir ara yazılım ile çok sayıda ince dilime bölünür ve 3B baskı cihazları, parça nihai hale gelinceye kadar her bir dilimi art arda olacak şekilde ekler [14]. Üretilmek istenen model öncelikle eklemeli imalat standart arabirimi olan STL dosya formatına dönüştürülmelidir. Daha sonra, çeşitli düzenlemelerin yapılması, üretim tablasına yerleşim ve konumlandırma, ihtiyaç duyulduğu takdirde destek yapılarının eklenmesi gibi bazı ön hazırlık işlemlerine ihtiyaç duyulur. Ardından 3 boyutlu model sanal ortamda dilimlenerek katmanlara ayrılır ve üretime hazır hale getirilir. Bu işlemlerden sonra üretim cihazına gönderilerek üretim gerçekleştirilir. Eklemeli imalat, katmanlar halinde üretildiği için geleneksel üretim yöntemleri ile üretilemeyen kompleks yapıların üretimine olanak sağlar. Ayrıca tasarımcılar için oldukça esnek bir üretim yöntemidir.

Geleneksel üretim yöntemlerinden talaşlı imalatta ise istenen ölçü ve şekildeki bir ürünü oluşturmak için model dışında kalan fazla malzemenin hammaddeden çıkarıldığı imalat işlemidir. Bu yöntemde malzemelerin israfı ve ürünün üretim maliyetini artıran yüksek kalifiye işgücü gereksinimi gibi dezavantajlar bulunmaktadır[15]. Eklemeli imalat, katmanlar halinde malzeme ekleyerek ürün oluşturduğu için malzeme israfını minimize eder. Ayrıca, 3B baskı cihazları önceden programlanmış olduğundan, vasıflı işçilik veya sürekli denetim gerektirmezler [15].

B. *Eklemeli İmalat Yöntemleri*

3B baskı için birçok farklı teknik vardır ve 3B yazıcıda bir yöntemin seçilmesi bütçe, malzeme, görünüm ve mekanik özellikler gibi faktörlerden etkilenir[16]. Şekil 2.1'de de gösterildiği gibi Amerikan Malzeme Testleri Derneği (ASTM), Eklemeli İmalat yöntemlerini standart terminolojiye göre yedi ana kategoriye ayırmıştır. Bunlar, fotopolimerizasyon (photopolimerization), malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), toz yataklı eritme (powder bed fusion), levhalı sac yöntemi (sheet lamination process) ve direkt enerji depolama (directed energy deposition) olarak ifade edilir [17].



Şekil 2.1: Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması [18]

Fotopolimerizasyon: Bu 3B baskı yönteminde fotopolimer reçine ile dolu bir konteynere sahiptir. UV ışığı, reçine tabakasını katman katman sertleştirir. 3B baskı cihazının tasarımına göre modelin oluştuğu platform aşağı veya yukarı doğru hareket etmeye devam eder ve sonraki katmanlar bir öncekinin üzerine inşa edilir. Fotopolimerizasyonun üç alt tipi vardır. Bunlar stereolitografi, dijital ışık işlemi ve aralıksız dijital ışık işlemi yöntemleridir [19].

Malzeme püskürtme: Malzeme püskürtme temelde iki boyutlu ink jet yazıcılar gibi çalışırlar. Malzeme, havuzdan bir ağızlık yardımı ile platforma püskürtülür ve ardından katılaşarak katmanlardan oluşturulur. Bu işlem sürekli veya isteğe bağlı olarak devam edebilir [20].

Toz yataklı erime: Toz yataklı eritme yöntemlerinde genel olarak platformda malzeme toz halinde bulunur ve laser veya elektron ışınları ile birbirlerine kaynaşması sağlanır. Toz yatak ayrıca ürüne destek görevi de

görür. Malzeme olarak plastik veya metal kullanılabilir. Karmaşık ürünler üretilebilir toz yatak destek görevi gördüğü için ayrıca destek malzesine ihtiyaç duyulmaz [22].

Direkt enerji depoloma (DED): Bu teknolojiyi kullanan şirketler arasında Fransa'dan BeAM, Almanya'dan Trumpf ve ABD'den Sciaky bulunmaktadır. DED yöntemi, çok eksenli bir kol üzerine monte edilmiş bir nozülden oluşur. Bu nozül, eritilmiş malzemeyi, biriktirme yüzeyine aktarır. Bu işlem, nozülun sadece X ve Y eksenlerinde değil, birden çok yönde hareket edebilmesini sağlayan eriyik biriktirme yöntemi gibidir. 4-5 eksenli makinelere sahip olduğu için malzeme herhangi bir açıda biriktirilebilir. Bu teknoloji metaller ve polimerler ile de kullanılabilir. Eksen sınırlaması olmaması ve metallerin onarımında veya üzerine ekleme yapmak için kullanılabilir olması başlıca avantajlarındandır [22].

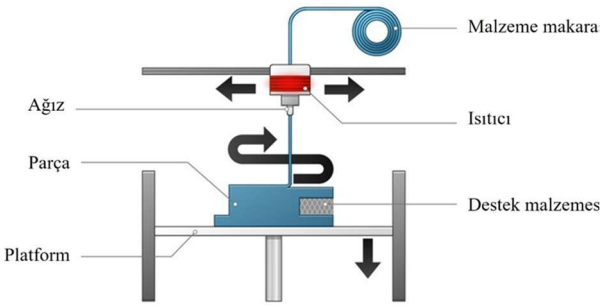
Yapıştırıcı ile püskürtme (BJ): Bu yöntemde, toz bazlı bir malzeme ve sıvı bir bağlayıcı birlikte kullanır. Toz malzemenin iki haznede stoklanır; biri toz besleyicidir, diğeri ise model inşa platformudur. Toz malzeme, ince tabaka halinde platformun üzerinde bulunur ve bir nozuldan yapıştırıcı püskürtülerek tozlar birbirine bağlanmaktadır. Daha sonra, platform aşağı indirilir ve toz malzeme üzerine serilir. Bu işlem üretim boyunca tekrarlanır, yapıştırılmamış tozlar modeli çevreleyerek onu destekler bu sayede destek yapısı olmadan üretim sağlanır. Süreçin sonunda yapışmamış toz malzemeden vakum yardımıyla arındırılır ve model elde edilir. Hızlı ve ucuz bir yöntemdir, toz halinde bulunabilen hemen hemen tüm malzemelerden üretim yapılabilir. Ancak parçaların mekanik dayanımları üretim yapısı gereği sınırlıdır [23].

Levha/sac laminasyonu : Levha/Sac laminasyonu yönteminde, malzeme plastik, metal veya seramik olabilir ve rulo halinde bulunur. Sistem kağıt gibi beslenir. İnce tabaka platformda lazer ile istenilen şekilde kesilir ve artan tabaka atık sarma rulosunda toplanır. Malzemenin türüne göre kesilen ince tabakalar ısı, basınç, kaynatma veya yapıştırma gibi yöntemlerle birbirlerine bağlanarak nihai model elde edilir.

Malzeme Ekstrüzyonu/Eriyik Yığma Modelleme (FDM): Eriyik yığma modelleme (FDM) tekniği, çalışma kolaylığı ve düşük maliyet gibi avantajlarından dolayı oldukça popüler hale gelmiştir. FDM, prototip parçaları oluşturmak için en sık kullanılan yazdırma tekniklerinden biridir ve üretim süresini %85'e kadar kısaltabilir. Bu teknik, endüstride, akademide ve ev uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ([24],[25])

FDM tekniğinde, makaraya sarılmış olarak cihaza entegre edilebilen tel formunda filamentler kullanılmaktadır. Hammadde ekstrüzyon başlığında ısıtılarak sıvı veya macun kıvamında 0,2 ila 1 mm arasında değişen çaptaki nozuldan geçirilerek gerekli noktalara serilir. Serme işlemi, inşa tablasının katman kalınlığı kadar aşağı indirilmesiyle tekrar başlar ve model inşa edilene kadar bu çevrim tekrarlanır. Eriyik biriktirme tekniği inşa aşamasında, termoplastik malzeme katılaşma noktasının hemen üstündeki bir sıcaklıkta tutulur. Her tabaka, bir önceki tabakaya yarı eriyik halde yapıştırılır. Plastik liflerin (filamentlerin) beslenme hızları kontrol edilebilmektedir, bu da hassas parçaların oluşturulmasını sağlar. Katman kalınlığı, kullanılan sarf malzemenin fiziksel özelliklerine, nozul çıkış çapına, hareketli kafanın hızına ve ekstrüzyon basıncına bağlı olarak değişebilir. Genel olarak, katman kalınlığı meme çapına göre 0,15 ila 0,5 mm arasında değişirken, yol genişliği 0,20 ila 6 mm arasında değişmektedir. Rulolara sarılı halde kullanılan termoplastik malzeme lifi genellikle 1,75 mm veya 3.00 mm çapındadır.

Bu yöntemde genellikle parça ağırlığını ve malzeme sarfiyatını düşürmek için ürünün iç doluluk oranı azaltılır. En dış birkaç kabuk katman ve iç yapı olarak seçilebilen çeşitli geometrilerle doldurulur. Ancak, ürünlerin gerçek hayatta kullanımı düşünüldüğünde, her noktadan aynı şekilde kuvvete maruz kalması mümkün değildir. Bu nedenle, topoloji optimizasyonu kullanılarak ürünün kullanılacağı şartlara göre simüle edilip strese maruz kalan yerlerin daha yoğun iç yapıda, diğer alanların daha az yoğun iç yapıda üretilerek daha verimli bir iç yapı oluşturulması amaçlanmaktadır [26].



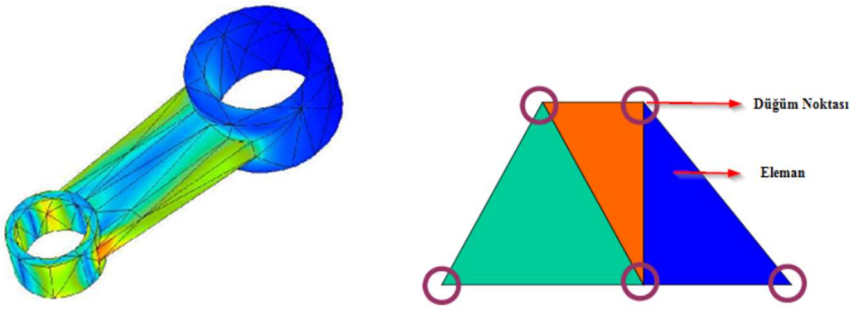
Şekil 2.2 : FDM tipi 3B yazıcı şematiği [27]

C. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bugün bilinen sonlu elemanlar yöntemi, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Topp tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bir uçağın gövdesinin gerilme analizi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, bilgisayar teknolojileri sayesinde çözülmesi uzun zaman

alabilecek problemler kısa sürede çözülebilmekte ve gerçeğe çok yakın sonuçlar vermektedir [28]. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık matematik denklemler gerektiren geleneksel yöntemlerin aksine, incelenecek elemanı veya sistemi, birbirine bağlı çok sayıda sonlu küçük elemandan oluşuyormuş gibi ele almaktadır. Sonuç olarak, sonlu elemanlar yöntemi, mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir hata payı ile çözebilen bir çözüm yöntemidir

İncelenecek olan sistem, Şekil 2.3'te olduğu gibi elemanlarına ayrılarak bir eleman ağına bölünür. Eleman çeşitli şekillerde olabilir ve birbirlerine köşe noktalarından bağlıdır. Bu noktalara düğüm noktası denir. Daha sonra her eleman için gerekli olan diferansiyel denklemler yazılır. Bu diferansiyel denklemlerden elde edilen varyasyonel ifade, her elemana uygulanarak bir cebirsel denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının çözümü istenilen büyüklüğü verecektir. Çözümlerde bilgisayar tarafından yapıldığı için yöntem kolaylık kazanır [29]. Şekil 2.3'te solda analiz programı tarafından elemanlarına ayrılmış bir model görülmektedir.



Şekil 2.3 : Düğüm noktası ve Eleman [30]

Yöntemin avantajlarından bazıları;

- Geometrisi karmaşık şekillerin kolaylıkla incelenmesini sağlar. Çözümlemede değişik sonlu elemanlar kullanılabilir ve alt bölgelere bölerek çözümleme yapılabilir.
- Genelleştirilebilir ve sınır şartları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra ve basitçe diğer problemlere adapte edilebilir.
- Sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınabilir.

Dezavantajlarını belirtmek gerekirse;

- Ancak malzeme özellikleri ve parametreleri iyi tanımlanmışsa doğru sonuçlar verebilir.
- Probleme büyüklüğüne göre büyük kapasiteli bilgisayar belleğine ve zaman gereklidir.
- Doğru sonuç elde edebilmek için sürekli ortamın bölünmesi ve girilen bilgilerin en az hatada olmalıdır. [31]

D. Optimizasyon

Optimizasyon, eldeki sınırlı kaynakların en verimli şekilde kullanımını sağlayarak belirli hedeflere ulaşmayı amaçlayan bir teknoloji olarak tanımlanabilir. Bu, işgücü, zaman, sermaye, süreçler, hammaddeler, kapasite, ekipman gibi mevcut kaynakları en randımanlı şekilde kullanarak maliyet azaltma, kar maksimizasyonu, kapasite kullanımı ve verimliliği maksimize etmeyi içerir [32].

E. Yapısal Optimizasyon

Yapısal optimizasyon, bir yapı veya sistemin fiziksel yapısını en verimli hale getirmek için alternatifler arasından en iyi çözümü seçme sürecidir. Bu süreçte genellikle ağırlık azaltma, rijitlik artışı, ısı iletimini arttırma gibi belirli özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenir. Yapısal optimizasyon yöntemini Şekil 2.3'te olduğu gibi yedi başlık altında inceleyebiliriz



Şekil 2.4 : Yapısal Optimizasyon Çeşitleri

Boyut Optimizasyonu: Boyut optimizasyonu, bir yapı veya sistemin temel ürün özellikleri için en uygun çözümleri bulmak amacıyla modelin büyüklüğünü belirleyen değişkenleri ele alan bir yapısal optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemde, kesit kalınlıkları, malzeme seçimi ve diğer parça parametreleri gibi değişkenler üzerinde çalışılarak en uygun boyutlar ve özellikler belirlenmeye çalışılır [33].

Şekil Optimizasyonu: Şekil optimizasyonu, bir yapının dış sınırlarının optimum duruma getirilmesini amaçlayan bir yapısal optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem genellikle deliklerin geometrisini değiştirerek lokal stres değerlerinin azaltılması gibi problemleri çözmek için kullanılır [33].

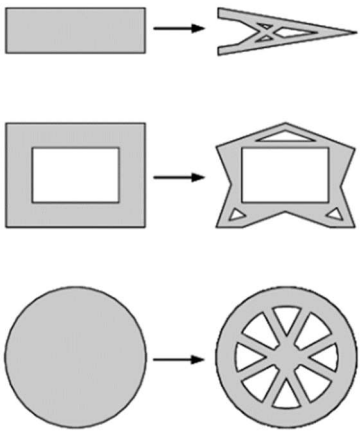
Topografya Optimizasyonu: İnce cidarlı sac parçalar gibi yapılar esnek olabilir ve belirli koşullar altında istenmeyen sonuçlar verebilir. Yapıyı güçlendirmek ve rijitliğini arttırmak için bazı girinti ve çıkıntılar veya bal peteği gibi hazır yapılar eklenir. Topografya optimizasyonu bu yapıların en uygun dağılımını simule etmek için kullanılır. [34].

Serbest Boyut Optimizasyonu: Serbest boyut optimizasyonu kaynaklanmış sac parçaların veya laminat kompozit malzemelerin katmanlarının en iyi sıralanışını ve kalınlığını simule ederek en iyi formu oluşturulmasını sağlar [35].

Serbest Şekil Optimizasyonu: Serbest şekil optimizasyonunda hedeflenen alanın belirlenmesine olanak sağlayarak sınırlı bir alanda otomatik olarak şekil değişkenleri üreterek en uygun şekil hatlarını belirler [35].

Topoloji Optimizasyonu: Topoloji optimizasyonu, belirli bir tasarım alanındaki malzeme düzenini optimize etmek için kullanılan ve bazı sabit kısıtlamalara tabi olan ve bir sistemin genel performansını en üst düzeye çıkaran ünlü bir tekniktir. Boyut optimizasyonu veya şekil optimizasyonu gibi diğer optimizasyon tekniklerine kıyasla topoloji optimizasyon tekniği önceden tanımlanmış bir konfigürasyon kullanmaz. Bunun yerine, belirli bir tasarım alanında çalışır ve malzemeyi son derece ihtiyaç duyulan yerlere yerleştirir ve kısıtlamaların da karşılanmasını sağlar. Topoloji optimizasyonu genellikle tasarım performansını değerlendirmek için sonlu eleman analizi (FEA) kullanır ve tasarım optimize kriteri algoritması kullanılarak optimize edilir.

Topoloji optimizasyonu uygulaması oldukça geniştir. Yapısal mekaniklerde, hafif ancak güçlü yapılara ulaşmak için büyük ölçüde kullanılır. Bu tür tasarımlar, ağırlık ve alanın önemli olduğu özellikle havacılık sektöründe çok daha yüksek güç/ağırlık oranına sahiptir. Topoloji optimizasyon tekniğinin kullanılmasının en büyük avantajı, bir tasarımın toplam boyutunu ve ağırlığını azaltırken performansı artırmasıdır [36]. Şekil 3.9'da örnek çalışmalar gösterilmiştir.

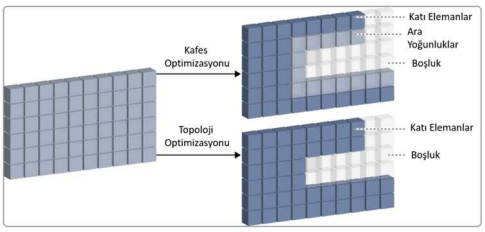


Şekil 2.5 : Topoloji Optimizasyonu [33]

Kafes (Lattice) Optimizasyonu: Kafes optimizasyonu, tasarım alanını optimize edilmiş bir kafes yapısıyla doldurur. Temelde katı elemanların kafes kirişlerle değiştirildiği geleneksel bir topoloji optimizasyonudur [37]. İki fazdan oluşmaktadır;

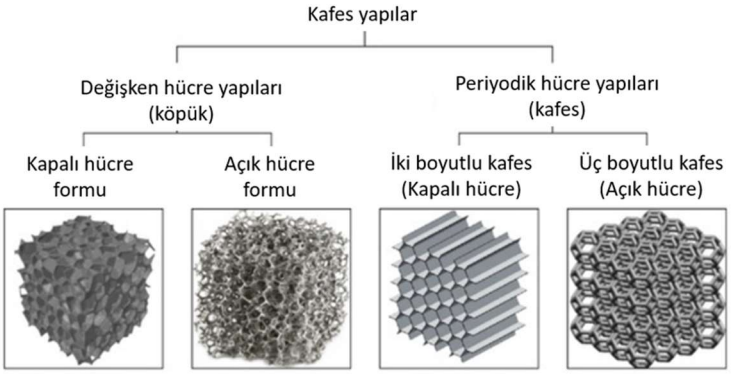
- İlk aşamada tasarım alanı klasik topoloji optimizasyonu uygulanarak optimize edilir sadece sınır şartlarında esnek davranılarak gözenekli yapı oluşması sağlanır ve bu alanda kafes yapıları oluşturulur.
- İkinci aşamada ise oluşturulan kafes yapılarına istenilen stres, yer değiştirme gibi mekanik şartlara göre boyut optimizasyonu uygulanır.

Nihai sonuç olarak katı hücreler ve ara elemanlar dediğimiz kafes yapılar bütünleşik olarak parçayı oluştururlar.



Şekil 2.6 : Topoloji Optimizasyonu ve Parçaya Kafes Optimizasyonu Karşılaştırması [37]

Şekil 2.6'da da görüldüğü gibi bir tasarım alanını elemanlara bölersek topoloji optimizasyonunda bir eleman ya doludur ya da boştur, fiziksel olarak ara değeri alamaz. Ancak topoloji optimizasyonundan farklı olarak kafes optimizasyonunda ara değerler vardır. Bu ara değerler Şekil 2.7'de verilen örneklerdeki gibi kafes yapılardır.

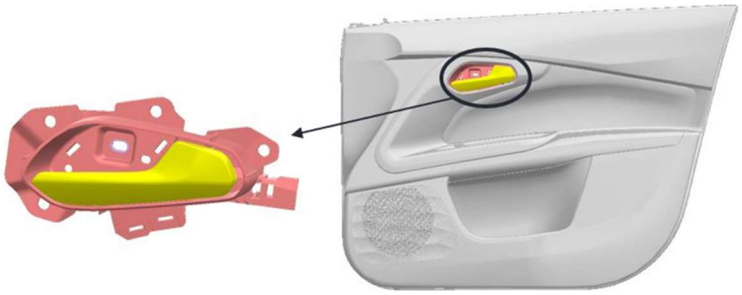


Şekil 2.7 : Kafes Yapıları [38]

Kafes geometrileri, köpük formu gibi rastlantısal ya da düzenli bir şekilde kendini tekrar eden sıralı yapılar oluşturabilir. Her bir geometrinin gözenek yapısı ve şekli gibi karakteristik özellikleri, ana parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Örneğin, ağ yapısı sayesinde darbe enerjisini sönümleyebilir, rijitliği korurken ağırlığı azaltabilir, titreşim ve seslerden yalıtım sağlayabilirler. Ayrıca düşük yoğunluğa ve hava boşluklarına sahip oldukları için ısı yalıtkanı olarak da kullanılabilirler.

F. Eklemeli İmalat ve Kafes Optimizasyonu

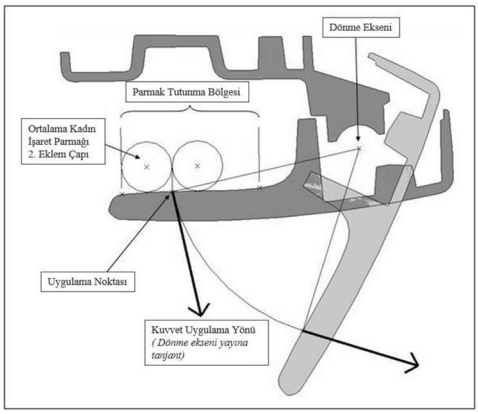
Kafes optimizasyonu doğası gereği oldukça karmaşık yapılar olduğundan özellikle eklemeli üretim için geliştirilmiştir zira başka bir üretim yöntemiyle kafes yapıları oluşturmak mümkün değildir. Eklemeli imalat teknolojisinin gelişimiyle bu kadar karmaşık tasarımları üretmek her geçen gün daha kolay hale gelmektedir. Bunun nedeni, geleneksel üretim yöntemleri ile işleme sürecinin parça geometrisinin dikkatli ve ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesini gerektirmesi, üretilen unsurların hangi sırayla olması gerektiği, işlem için hangi malzeme ve fikstürlerin kullanılması gerektiği gibi unsurları belirlemektir [39]. Ayrıca, topoloji ve kafes optimizasyonu sonucunda kompleks yapılar ortaya çıkar ve dış tasarım değişikliği gerekebilir. Bununla birlikte, eklemeli imalat ile üretilen parçalarda kompleks yapılar rahatlıkla üretilebilir ve bu çalışmanın amacı olan dış tasarım değişmeden iç yapı yoğunluğunda bölgesel değişiklik yapabilme imkanı sağlar.Bu çalışmada üzerinde çalışılacak parça araç kapı kolu olarak seçilmiştir. Hem görsel önemi olan stil ürünü hem de fonksiyonu olan kuvvet dayanımı gerektiren bir parça olması tercih sebebi olmuştur. Parçanın konumu ve çevre parçaları Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Parça üzerindeki gerekli modellemeler ve optimizasyona uygun hale getirilmesi için Siemens NX yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 2.8 : Araç kapı kolu mekanizması

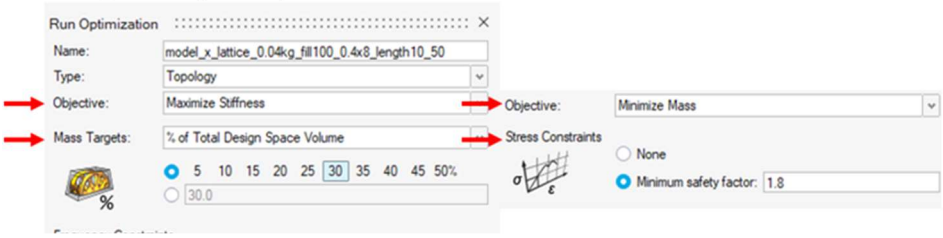
G. Optimizasyon Çalışmaları

Analiz ve optimizasyon çalışmaları için Altair Inspire kullanılmıştır. Altair Inspire analiz programının tercih edilme sebebi ise içerisinde doğrudan eklemeli imalat yöntemine uyumlu modüllerinin olmasıdır. Böylece analiz sürecinde ve sonuçların çıktısında FDM metoduna uygun çıktılar alınması mümkün olmuş ve çalışmanın doğruluğunu arttırmıştır. Şekil 2.9'da fiziksel testlerde uygulanan kuvvet yönü, uygulama noktası ve dönme ekseni gösterilmiştir. Bu veriler Şekil 2.9'da görüldüğü gibi analiz program üzerinde simüle edilmiştir.



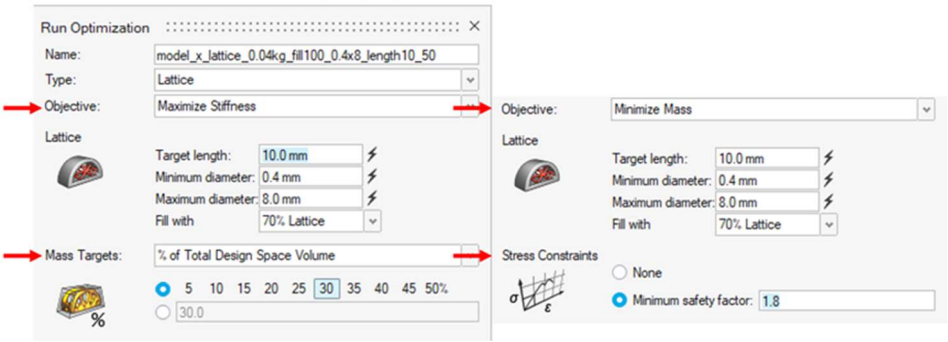
Şekil 2.9 : Kapı panel kolu kuvvet yönü ve noktası

Topoloji optimizasyonu için girilen parametreler Şekil 2.10'da verilmiştir. Optimizasyon türü seçildiği takdirde optimizasyon amacı için maksimum rijitlik ve minimum kütle olarak iki şekilde hedeflenmektedir. Maksimum kütlede sınır şartımız hedeflenen kütle olurken minimum kütlede sınır şartımız güvenlik faktörü olmaktadır. Bu iki değer arasında seçim yaptıktan sonra frekans ve istenilen minimum kalınlık miktarı belirlenerek optimizasyon başlatılabilir.



Şekil 2.10 : Topoloji optimizasyonu parametreleri

Aynı şekilde kafes optimizasyonu için de aşağıdaki parametreler arasında optimizasyon hedefimize yönelik seçimler yapabiliriz. Maksimum kütlede sınır şartımız hedeflenen kütle olurken minimum kütlede sınır şartımız güvenlik faktörü olmaktadır. Topoloji optimizasyonundan farklı olarak yüzdesel ifadeyle kafes yapı ile doldurulacak hacim, kafes yapısı kirişlerinin minimum ve maksimum çapları ve hedef kiriş uzunluğu gibi parametreler arasından seçim yapılabilir.



Şekil 2.11 : Kafes optimizasyonu parametreleri

Yapılan analizler ve optimizasyon çalışmaları sonucunda seksene yakın analiz sonucu elde edilmiştir. Her birinde farklı daha önce bahsedilen farklı parametreler denenerek optimizasyon çalışması yinelenmiştir ve optimum sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır.

Her birini ayrı ayrı üretip, teste sokmak mümkün olamayacağından Çizelge 2.1'de belirtilen üç farklı optimizasyon ile analiz edilen parçalar teste sokulmuştur.

Çizelge 2.1 : Testler için seçilen optimize edilmiş çıktılar

Optimizasyon	Ağırlık(g)	Maks Von Mises(Mpa)	Maks Yer Değiştirme(mm)
Topoloji	17,4	159,4	23,0
Kafes	18,0	53,2	18,7
Hibrit	22,4	290,1	29,3

Bu çıktılarda kullanılan parametreler ise;

Topoloji optimizasyonu için ağırlık hedefi olarak %30 seçilmiştir, minimum kalınlık olarak da 4 mm seçilmiştir. Optimizasyon sonucu oluşan model Şekil 3.19'da göstermiştir.

Kafes optimizasyonu için %100 kafes yapısı seçilmiştir, kiriş ölçüleri olarak da minimum kiriş çapı 0.4 mm, maksimum kiriş çapı 8.0 mm, hedef kiriş uzunluğu olarak da 10.0 mm seçilmiştir. Optimizasyon sonucu oluşan model Şekil 3.20'de göstermiştir.

Hibrit olarak verilen çıktı da ise %70 kafes yapısı seçilmiştir, kiriş ölçüleri kafes optimizasyonu ile aynıdır. Buradaki amaç %70 kafes, %30 dolu bir parçadaki durumu gözlemlemektir. Optimizasyon sonucu oluşan model Şekil 2.12'de göstermiştir.



Şekil 2.12 : Hibrit,kafes ve topoloji optimizasyon

H. Optimizasyon Dataları İle Modellerin Üretime Hazır Hale Getirilmesi

Elde edilen optimizasyon sonuçları .stl formatında çıktılar, eklemeli imalat yöntemlerinden FDM tekniği ile çalışan 3 boyutlu cihazda stres bölgelerine göre yoğunlukları özelleştirmek için kullanılmıştır.

Test modellerini üretebilmek için 3 boyutlu yazıcıya yüklemeden önce dilimleme yazılımı Bambu Studio ile modeller üretilmeye uygun hale getirilmiştir. Kapı kolu modelinin nominal versiyonu ile optimizasyon dataları Şekil 2.12'de gösterildiği gibi aynı pozisyonda konumlandırılarak kesişim bölgesi oluşturulmuştur.



Şekil 2.13 : Üretim kesitleri

Optimizasyon datası içeren üç model için Şekil 3.23'teki gibi optimizasyon datası dışındaki kalan alan için üretim parametreleri girilmiştir. Katman yüksekliği 0.2 mm, genişlik 0.4 mm, iç yoğunluk %10 ve grid deseni, 3 sıra dış katman olarak tanımlanmıştır. Üretilen üç model için de aynı ayarlar kullanılmıştır.

İ. Modellerin Üretilmesi

Modeller, Bambu Studio yazılım programı aracılığıyla bütün parametreleri ayarlanarak üretime hazır hale getirilmiştir. Üretim için kullanılan FDM 3 boyutlu yazıcı Bambu Lab X1-Carbon modelidir [40].

Eklemeli imalatta (FDM) genellikle kullanılan bir termoplastik malzeme olan PLA tercih edilecektir. Isı tablası gerektirmemesi veya çok az ihtiyaç duyması ve büyük parçaları tolere edebilmesi, bu malzemenin tercih edilmesini sağlamıştır.

J. Üretilen Fiziki Modeller

Üç farklı optimizasyon çalışması ve iki farklı iç yoğunluk modelinden beşer adet üretilmiştir. Üretilen parçaların iç kesitini görebilmek amacıyla birer numunede iç kesiti daha iyi görebilmek için üretim işlemi yarıda kesilmiştir. Şekil 3.25 – 3.29 arasında verilen üç boyutlu yazıcı yalımındaki kesitlerin görüntüsü fiziksel parçalarda da gözlemlenmiştir. Parçaların birbiri ile karışmaması için aşağıdaki Çizelge 4.1'deki gibi numaralandırılmıştır.

Çizelge 3.1 : Model Numaralandırılması

Model No	Model Adı
1	Topoloji Optimizasyonu
2	Kafes Optimizasyonu
3	Hibrit Optimizasyon
4	%30 Yoğunluk
5	%100 Yoğunluk

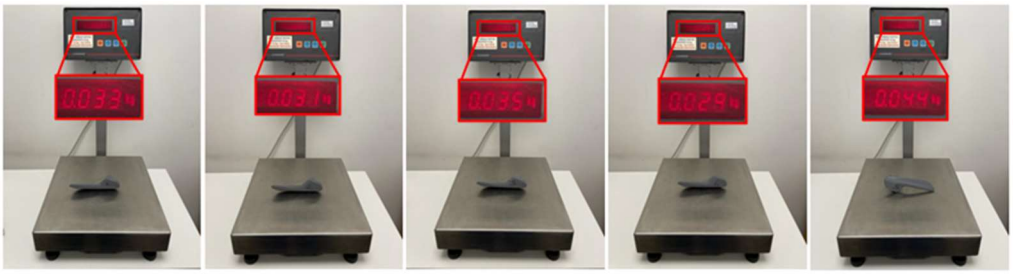
Şekil 3.1'de topoloji optimizasyonu ile üretilen parça kesitinde görüldüğü gibi topoloji optimizasyonu sonucu dolu olarak tanımlanan yerler tam dolu şeklinde üretilmiş diğer alanlar yazılımda tanımlandığı üzere %10 dolu grid desenli olarak üretilmiştir. Ayrıca şekil 3.1'de kafes optimizasyonu ile üretilen parça kesiti gösterilmiştir. Kafes optimizasyonunda elde edilen modelde olduğu gibi kafes kirişleri

gözlemlenmektedir. Diğer alanlar yazılımda tanımlandığı üzere %10 dolu grid desenli olarak üretilmiştir. Hibrit optimizasyon ile üretilen parça kesiti Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kafes optimizasyon gibi hibrit optimizasyonda da kafes kirişleri gözlemlenmekte ve topoloji optimizasyonundan kaynaklı tam dolu alanlar da görülmektedir. Diğer alanlar yazılımda tanımlandığı gibi yine %10 dolu grid desenlidir. Şekil 3.1'de optimizasyon çalışması olmadan sadece %30 iç yoğunluk oranında ve grid desenli olarak üretilen parça kesiti gösterilmiştir.

Şekil 3.1'de ise yine optimizasyon çalışması olmadan tam dolu ve grid desenli olarak üretilen parça kesiti gösterilmiştir. Şekil 3.2'de üretilen parçaların ağırlıkları Loadmate hassas terazi ile ölçülmüştür. Beklenildiği gibi parçanın tam dolu ağırlığı 44 g'dır. %30 doluluk oranında en düşük ağırlık olan 29 g gelmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonrası ise topoloji optimizasyonu için 33 g, kafes optimizasyonu için 31g olurken hibrit optimizasyon 35 g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1 : Topoloji optimizasyonu ile üretilen modelin fiziki kesiti



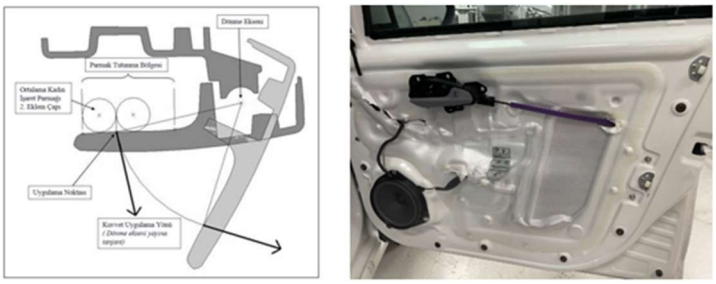
Şekil 3.2 : Üretilen fiziki parçaların ağırlıkları (soldan sağa topoloji opt. - kafes opt. - hibrit opt. - %30 yoğunluk - %100 yoğunluk)

Çizelge 3.2 : Üretilen fiziki parçaların ağırlık tablosu

Model No	Model Adı	Ağırlık (g)
1	Topoloji Optimizasyonu	33
2	Kafes Optimizasyonu	31
3	Hibrit Optimizasyon	35
4	%30 Yoğunluk	29
5	%100 Yoğunluk	44

K. Fiziki Parçalara Çekme Testi Uygulanması

Üretilen parçaların mukavemetlerinin belirlenebilmesi amacıyla ve optimizasyon çalışması olmadan standart yoğunluk oranlarıyla karşılaştırabilmesi için parçalara çekme testi uygulanmıştır. Şekil 4.7'de verilen optimizasyon çalışmalarında da referans alınan test şablonuna göre çekme testi sistemi hazırlanmıştır.



Şekil 3.3 : Kapı açma kolu çekme testi şablonu ve fiziki test durumu

Testler sırasındaki tesadüfi değerleri ve sapmayı azaltmak amacıyla her bir fiziki model için testler üç kez tekrarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda ölçülen değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.8'de parçaların test sonrası kırılmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Soldan sağa 1-5 parçaların test sonrası kırılmaları

Çizelge 3.3 : Modellerin çekme testi değerleri

Model No	Model Adı	Test 1(N)	Test 2(N)	Test 3(N)
1	Topoloji Optimizasyonu	411,9	406,2	428,0
2	Kafes Optimizasyonu	355,5	357,7	372,5
3	Hibrit Optimizasyon	395,2	408,4	405,3
4	%30 Yoğunluk	270,1	265,6	263,2
5	%100 Yoğunluk	417,6	420,9	424,3

III. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen tez çalışmasında topoloji ve kafes optimizasyonu yanı sıra iki optimizasyonun birleşimi ve standart olarak tam dolu ve %30 iç yoğunluk ile üretilen kapı kolları dayanımı karşılaştırılmıştır. Altair Inspire analiz programı ile optimize edilmiş model dataları standart %10 iç yoğunluk birleştirilerek optimize edilmiş fiziki parçalar üretilmiştir. Her bir parça için gerçekleştirilen üç testin ortalaması aşağıdaki tabloya işlenmiş ve kuvvet / ağırlık oranı elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.1'deki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.1 : Çekme testi sonuçları ve birim ağırlık başına karşılanan kuvvet değerleri

Model No	Model Adı	Ağırlık (g)	Ortalama Kuvvet (N)	Kuvvet / Ağırlık
1	Topoloji Optimizasyonu	33	415,4	12,59
2	Kafes Optimizasyonu	31	361,9	11,67
3	Hibrit Optimizasyon	35	402,97	11,51
4	%30 Yoğunluk	29	266,3	9,18
5	%100 Yoğunluk	44	420,93	9,57

Topoloji optimizasyonu tam dolu parçaya göre %32, %30 dolu parçaya göre ise %37 daha avantajlıdır. Kafes optimizasyonu tam dolu parçaya göre %22, %30 dolu parçaya göre %27 daha avantajlı olmuştur. Hibrit şekilde üretilen parça tam dolu parçaya oranla %20, %30 dolu parçaya oranla %25 daha avantajlıdır.

IV. TARTIŞMA

Tablodan da görüldüğü gibi topoloji optimizasyonu ile üretilen parça en yüksek kuvvet/ağırlık oranına erişmiştir ve kırıldığı kuvvet parçanın tam dolu haline yaklaşmıştır. Bu sonuç optimizasyonun doğru yerlerden boşaltma yaptığını göstermektedir. Kafes optimizasyonu ortalama kuvvet olarak yüksek değerlere ulaşamasa da ağırlık azaltmada önemli bir düşüş gerçekleştirmiştir. Hibrit şekilde üretilen parçada kafes optimizasyonuna yakın değer elde edilse de diğer iki optimizasyonun arkasında kalmıştır.

Otomotiv, havacılık ve biyomedikal gibi ufak ağırlıkların bile önemli olduğu sektörlerde kuvvet kaybı yaşamadan %30'a varan verimlilik artışı çok önemli olacaktır. Bu çalışma ile optimizasyon ve eklemeli imalat teknolojilerinin bir arada kullanılabileceği gösterilmiş ve mevcut duruma farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma ile eklemeli imalat yöntemlerinde sadece standart homojenize iç yoğunluklar kullanılmak zorunda olunmadığı ve kullanılacak yere, fonksiyona göre analizler yapılarak iç yapının özelleştirilerek dayanımdan feragat etmeden ağırlık azaltımında mümkün olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışıma TOFAŞ ARGE Merkezi tarafından desteklenmiştir, Ayrıca bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar her iki kuruma da teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] Y. Huang, M. C. Leu, J. Mazumder and A. Donmez, (2015). "Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations," Journal of Manufacturing Science and Engineering, p. 137(1).

[2] Bruker Nano Surfaces. (2023). How Can 3D Optical Profiling Optimize Additive Manufacturing Processes?. AZoM. Retrieved from https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17901.S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, "A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569–571, Nov. 1999.

[3] Jones, E. H. David (1974, October 3). Ariadne. New Scientist. Retrieved from https://books.google.com.tr/books?id=nvabM3KXNsUC&pg=PA80&redir_esc=y#v=onepage&q&f=falseR. E. Sorace, V. S. Reinhardt, and S. A. Vaughn, "High-speed digital-to-RF converter," U.S. Patent 5 668 842, Sept. 16, 1997.

[4] Our Story. https://www.3dsystems.com/our

[5] Barnatti, Cristopher. (2013). 3D Printing : The Next Industrial Revolution. Nottingham, England

[6] Crump, S. Scott. (1989). U.S. Patent No. 5,121,329. Retrieved from Google Patents

[7] Three Dimensional Printing. Retrieved from https://www.mit.edu/~tdp/whatis3dp.html

[8] FDM Prodigy and Prodigy Plus. Retrieved from https://support.stratasys.com/en/printers/fdm-legacy/fdm-prodigy-and-prodigy-plus

[9] RepRapOneDarwin. Retrieved from https://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin

[10] Organovo Has Its First Commercial 3D Bioprinter. (2009). Retrieved from https://singularityhub.com/2009/12/03/organovo-has-its-first-commercial-3d-bioprinter/

[11] Organovo, Yale Team Up to Develop Tissues for Transplant Research. (2014). https://www.engineering.com/story/organovo-yale-team-up-to-develop-tissues-for-transplant-research

[12] National Aeronautics and Space Administration. (2014). Space Tools on Demand : 3D Printing in Zero G. Washington, DC. National Aeronautics and Space Administration

[13] Öğütcü, H. (2020) Retrieved from https://egirisim.com/2020/08/31/uc-boyutlu-yazici-ureten-yerli-girisim-zaxenin-hikayesi/

[14] CustomPartNet. (2008). Inc., Retrieved from http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication

[15] Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31, 53-69.

[16] Reid, S.R., Reddy, T.Y. & Gray, M. D. (1986). Static and Dynamic AxialCrushing of Foam-Filled Sheet Metal Tubes, International Journal of Mechanical Sciences., 28(5), 295-322

[17] May, T. (2021). Simulation and Optimization of 3D-Printer Enclosure Environment (Master's thesis). Available from ProOuest Dissertations and Theses database. (UMI No. 28492990)

[18] J. Griffey, (2014). "The Types of 3-D Printing," Library Technolody Reports, pp. 8-12.

[19] Yalçın, Bekir., Ergene, Berkay. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi Ve Metalurjisi. SDU International Journal of Technological Science. Vol. 9 No 3. 65-88.

[20] M. Hatzenbichler, M. Geppert, S. Gruber, E. Ipp, R. Almedal, and J. Stampfl. (2012). "DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts", Proc. SPIE 8254, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications IV, 82540E.

[21] Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM. (2018). https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion

[22] Razavykia, Abbas & Brusa, Eugenio & Delprete, Cristiana & Yavari, Reza. (2020). An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting. Materials. 13. 10.3390/ma13173895.

[23] What is Binder Jetting? Retrieved from https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting

[24] T. Chartier and A. Badey, (2013) "Rapid Prototyping of Ceramics," in Handbook of Advanced Ceramics, Oxford, Elsevier Inc.

[25] S. H. Masood, (2014) "Advances in Fused Deposition Modeling," Comprehensive Materials Proccessing, vol. 10, pp. 69-91.

[26] Apak, S. (2010). Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[27] Material extrusion – FDM. (2018). Retrieved from. https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion

[28] Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., Topp, L. J. (1956) Stiffness and deflection analysis of complex structures. Journal of the aeronautical sciences, 23(9): 805-823.

[29] Oldaç, O. (2000). Stasyoner ve Dönen Disklerin Titreşimleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[30] Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM). http://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf. (2016).

[31] Kurtay, T. (1980). Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Ofset Atölyesi, İstanbul.

[32] Türkay, M. (2018). Optimizasyon modelleri ve çözüm metodları. http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/Optimizasyon.pdf

[33] Wang, Y., Wang, Z., Xia, Z., & Poh, L.H. (2018). Structural Design Optimization Using Isogeometric Analysis: A Comprehensive Review. Computer Modeling in Engineering & Sciences

[34] Yapısal Optimizasyon. https://analizsimulasyon.com/yapisal-optimizasyon/

[35] Structural Optimization Explained. https://altair.com/structural-optimization-explained

[36] Taha, B. (2021). Evaluating The Thermal Performance of Topology Optimized Low-Cost 3D Printed Heat Sink Made of Copper (Master's thesis). Available from ProOuest Dissertations and Theses database. (UMI No. 28667652)

[37] Lattice Structure Optimization. https://2021.help.altair.com/2021.2/hwsolvers/os/topics/solvers/os/lattice_structure_optimization_intro_r.htm#lattice_structure_optimization_intro_r

[38] Park, Kwang-Min, Kyung-Sung Min, and Young-Sook Roh. (2022). "Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements" Materials 15, no. 1: 97. https://doi.org/10.3390/ma15010097

[39] Ian Gibson David Rosen & Brent Stucker, (2015). " Additive manufacturing Technologies – 3D printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing" Book II Edition

[40] Bambu Lab X1-Carbon 3D Printer. https://store.bambulab.com/products/x1-carbon-3d-printer

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Aynı Binada Kolonların Farklı Yerleştirilmesinin Yapı Maliyetine Etkisi

*Esra MUTİ *, Ercan ÖZGAN [b]*

[a] Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık ABD, Düzce/Türkiye.
[b] Düzce Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** esra.muti@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, Sakarya ili Serdivan İlçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binanın analizi yapılmıştır. Binada taşıyıcı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde ki farklı yerleşimlerinin yapı maliyetine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina; zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m, uzunluğu ise 18 m'dir. Bina modelinde "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla toplam 6 aks bulunmaktadır. Oluşturulan bina modellerinde kirişler 30x50 cm alınırken döşeme kalınlığı ise 15 cm olarak alınmıştır. Oluşturulan 3 model binadan referans olan bina modeline 2018 deprem yönetmeliği şartlarına uygun olarak "x" ve "y" yönlerinde kolonlar yerleştirilmiş, diğer iki model binaya yerleştirilen kolonlar ise farklı şekillerde yerleştirilmiştir. Tarafımızca oluşturulan Referans model bina ile kolon yerleşimi piyasa da ofisi olan bir inşaat mühendisi ve bir mimar tarafından yapılan iki örnek model bina İdeCad programı ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda deprem etkisine maruz bırakılan 3 model binanın kalıp, beton ve donatı maliyetleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Aynı bina planına kolonların farklı yerleştirilmesi durumunda binaların sadece deprem performanslarının değil yapı maliyetlerinin de önemli düzeyde değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Depreme dayanıklı bina, Tasarım, Kolon, Maliyet,*

The Effect of Different Placement of Columns in the Same Building on Construction Cost

ABSTRACT

In this study, a reinforced concrete building located in Beşköprü neighbourhood of Serdivan District of Sakarya province was analysed. The effect of different placements of columns, which are load-bearing elements in the building, on the building's Project building cost was examined. In the building model created for this purpose, the floor height is 3 meters and the building has ground floor + 3 floors. The building width is 15 m and the length is 18 m. While there are 4 axes with 5 meters intervals in the "x direction" of the building model, there are a total of 6 axes in the "y direction" with 3.5 m, 3 m, 5 m, 3 m and 3.5 m intervals. In the building models created, the beams sections were taken as 30x50 cm and the floor thickness was taken as 15 cm. Columns were placed in the "x" and "y" directions in the reference building model of the three model buildings created, in accordance with the requirements of the 2018 earthquake regulations, and the columns placed in the other two model buildings were placed in different ways. The reference model building created by us and the column layout of two sample model buildings built by a civil engineer and an architect who have an office in the market were analysed with the IdeCad program. As a result of the analysis, the formwork, concrete and reinforcement costs of 3 model buildings exposed to earthquake effects were calculated and compared. It has been determined that if columns are placed differently in the same building plan, not only the earthquake performance of the buildings but also the construction costs change significantly.

Keywords: *Earthquake-resistant building, Design, Column, Cost,*

I. GİRİŞ

Modern şehirleşme süreçleri, dünya genelinde artan nüfus ve kentsel yoğunlaşma eğilimleri ile birlikte, yapıların tasarım ve inşasında daha karmaşık ve özen gerektiren bir süreci beraberinde getirmiştir [1]. Bu süreçte, özellikle deprem gibi doğal afetlerin etkisi altında bulunan bölgelerde, yapıların dayanıklılığı ve

güvenliği mühendislik topluluğu için temel bir öncelik haline gelmiştir. Betonarme yapılar, sağlam ve mukavemetli yapı özellikleri nedeniyle deprem riski yüksek bölgelerde tercih edilen yapı tipi olmuştur. Ancak, bu yapıların deprem performansını optimize etmek ve güvenliğini artırmak adına yapılan araştırmalar sürekli olarak önemini korumaktadır.[2]

Depremler sırasında binaların ve altyapıların hasar görmesi yaygın bir durumdur. Depreme dayanıklı tasarım ve yapısal düzenlemeler, binaların ve diğer yapıların depremlere karşı daha dirençli hale getirilmesini amaçlar. Bu, güçlendirilmiş yapı elemanları, esneklik sağlayan tasarımlar, sismik izolasyon sistemleri ve yük dağılımını optimize eden stratejiler gibi çeşitli teknikleri içerebilir.[3] Deprem, birçok ülkede deprem bölgeleri olarak adlandırılan belirli bölgelerde daha sık meydana gelir. Bu bölgelerde, yapı kodları ve standartları genellikle deprem dayanıklılığını artırmak amacıyla daha sıkıdır. Deprem bölgelerinde inşa edilen yapıların, depreme dayanıklı olması, temel tasarımı ve yapı malzemeleri seçimi gibi faktörlerde önlemler alınması önemlidir.[4] Depremler doğal afetlerin en yıkıcı olanlarından biridir ve insanların güvenliği ve yapıların dayanıklılığı için ciddi tehdit oluştururlar. Depremlere karşı bilinçli bir şekilde hazırlık yapmak, depreme dayanıklı yapılar inşa etmek ve afet yönetimi önlemlerini uygulamak büyük önem taşır. Böylece, depremlerin etkileri en aza indirilebilir ve can kaybı ile hasarlar azaltılabilir. Her yapının belirli doğal frekansları vardır. Eğer deprem dalgalarının frekansı, yapının doğal frekansına yakın veya aynıysa, yapıda rezonans meydana gelir ve bu da yapıdaki hasarın artmasına neden olabilir.[5] Yapının bulunduğu zeminin özellikleri, deprem sırasındaki yapı davranışını büyük ölçüde etkileyebilir. Sıvılaşma, yumuşak zeminlerde meydana gelen ve yapıların hasar görmesine veya çökmelerine neden olabilecek bir olgudur.[6] Yapıların depremlerde daha iyi performans göstermeleri için depreme dayanıklı tasarım prensiplerine uygun olarak tasarlanması ve inşa edilmesi gerekir. Bu prensipler, yapı norm ve yönetmeliklerinde detaylı olarak belirtilir.[7] Bu sebeple, deprem ve yapı ilişkisi, yapı mühendisliği, jeoloji ve sismoloji gibi birçok bilim dalını kapsayan kapsamlı bir konudur. Bu nedenle, deprem riski olan bölgelerde yapılacak olan yapıların, depreme dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi hayati önem taşır. Son yıllarda yaşadığımız depremler ve oluşan can kayıpları ülkemizde depreme dayanıklı yapı analiz ve tasarımı konusunu daha da önemli hale getirmiştir. Deprem konusunda yapılan akademik çalışmalar sonucunda ve bilgisayar, teknoloji, malzeme ve imalat sektöründeki gelişmelere paralel olarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik kapsamına Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesine ilişkin 7. Bölüm eklenmiş ve 06.03.2007 tarih 26454 numaralı resmî gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir (DBYBHY-2007).

"Metraj", genellikle bir alanın, uzunluğun, hacmin veya miktarın ölçülmesi ve belirlenmesi anlamına gelir. İnşaat, mimarlık ve mühendislik gibi alanlarda, "metraj" terimi genellikle bir yapı projesinde kullanılacak malzemelerin miktarını belirlemek için kullanılır.[8]

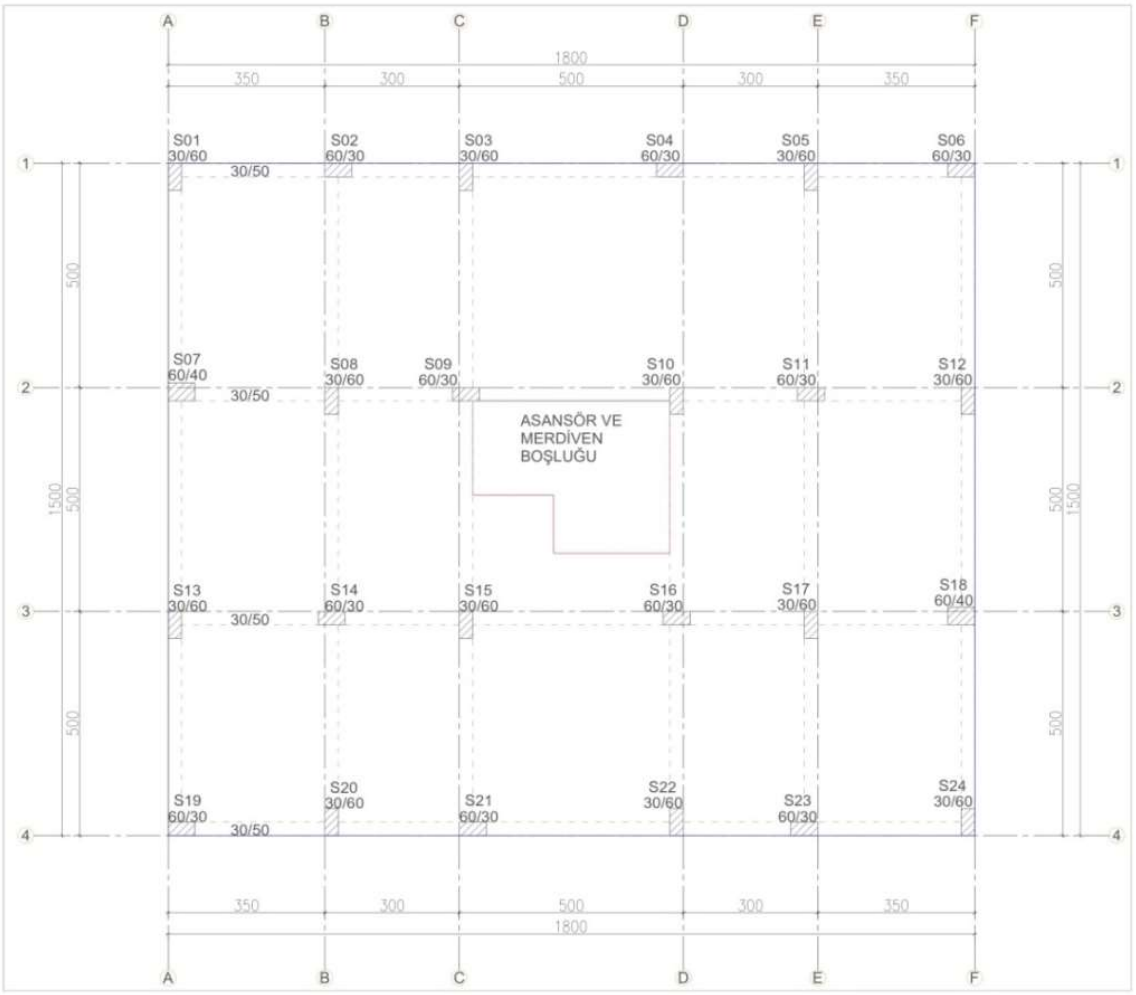
Yapı metrajı, bir inşaat projesinde kullanılacak malzemelerin miktarını belirleyen bir hesaplama sürecini ifade eder. Bu süreçte, projede kullanılacak beton, çimento, demir, taş, tuğla, kum gibi malzemelerin miktarı ölçülerek belirlenir. Aynı zamanda, işçilik metrajı da yapılan işlerin miktarını ve niteliğini belirler.[9] Metraj hesaplamaları, genellikle proje yönetimi, bütçe planlaması ve malzeme temini gibi süreçlerde kullanılır. Doğru metraj hesaplaması, bir inşaat projesinin maliyetinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve kaynakların etkin bir şekilde kullanılması için önemlidir.[10]

Bu çalışmada, betonarme bir yapı modelinin tasarım sürecinde plana farklı şekillerde yerleştirilen kolonların, yapının maliyetine etkisi incelenmiştir. Yapının genel performansını iyileştirmek ve deprem sırasında meydana gelebilecek potansiyel hasarları en aza indirmek amacıyla projelerde kolon yerleşimlerinin 2018 deprem yönetmeliği şartlarına uygun ve doğru bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, aynı bina projesi üzerinde 3 farklı kolon yerleşimine sahip 3 ayrı bina modeli oluşturulmuş ve bu farklı kolon yerleşimlerine sahip 3 bina modelinin metraj değerleri incelenmiştir. 3 farklı kolon yerleşimine sahip olan 3 bina modelinin analizleri sonucunda elde edilen metraj sonuçları karşılaştırılmış, kolon yerleşiminin önemi her yönü ile ortaya konulmuş ve özellikle betonarme yapı tasarımı yapan, uygulayan inşaat mühendisleri ve mimarlar başta olmak üzere tasarım süreçleri ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

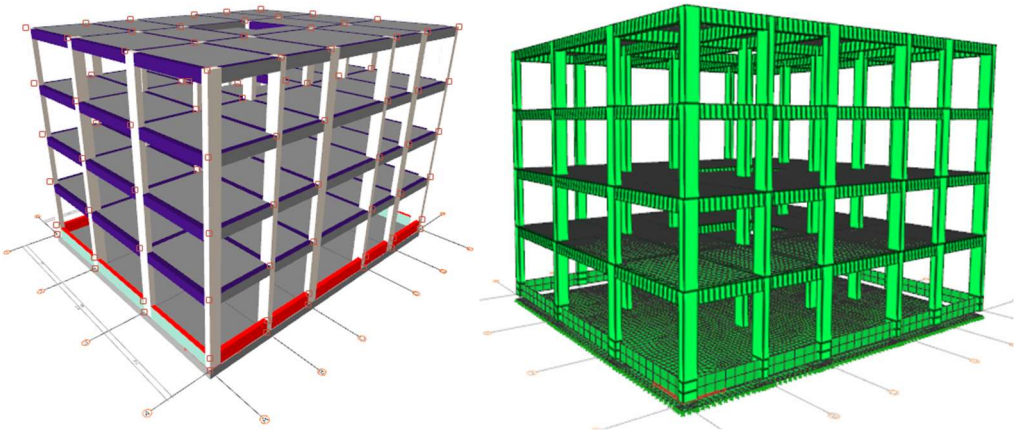
II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada analizi yapılan bina Sakarya ili, Serdivan ilçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binadır. Bu betonarme binada taşıyıcı yapı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde ki farklı yerleştirilmesi durumunda binalarda oluşan maliyet farklılıkları incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m uzunluğu 18 m'dir. Bina modelinin "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" ise 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla olmak üzere 6 aks bulunmaktadır. Farklı kolon yerleşimi ile oluşturulan 3 bina modelinde de kirişler 30x50 cm ve döşeme kalınlığı da 15 cm seçilmiştir. Model

binalarda asansör boşluğu 180x210 cm, merdiven boşluğu da 260x340 cm olarak bırakılmıştır. Tasarlanan bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünüşü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Tasarlanan Bina Modelinin Kat Planı

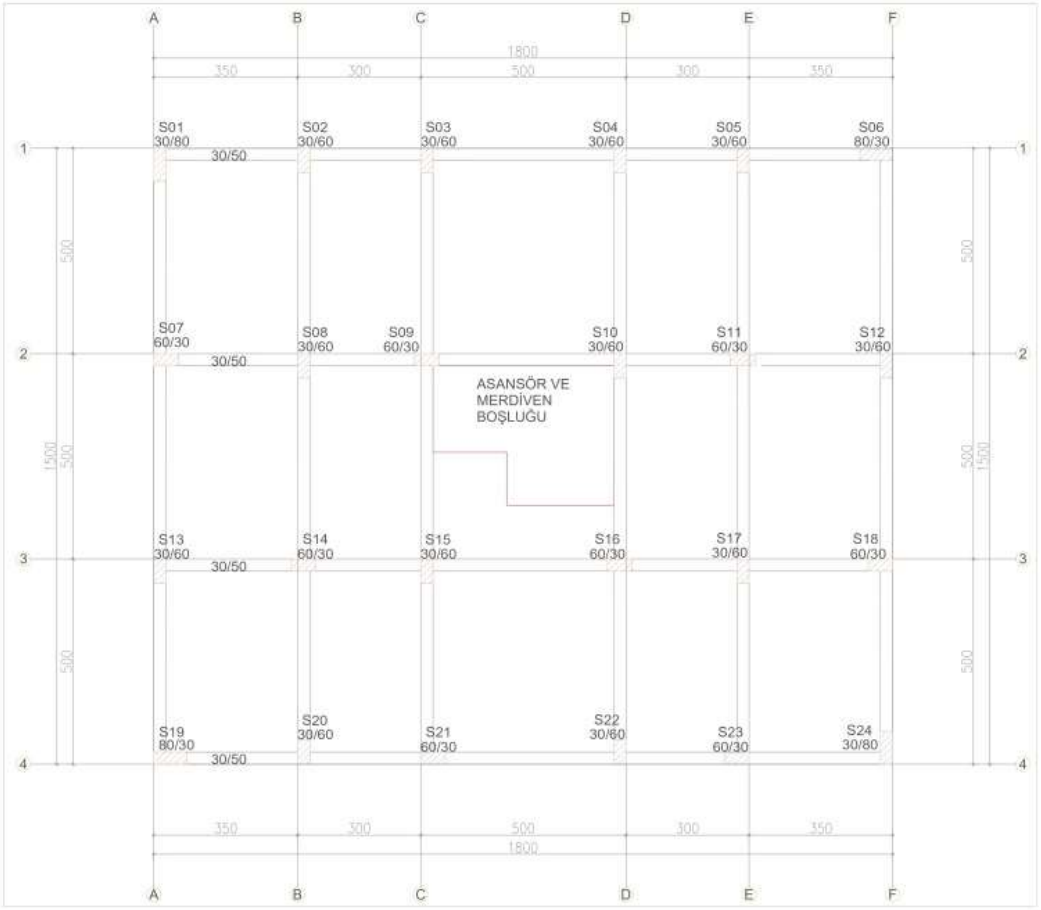


Şekil 2. Tasarlanan Bina Modelinin Katı Model ve Analiz Modeli Görselleri.

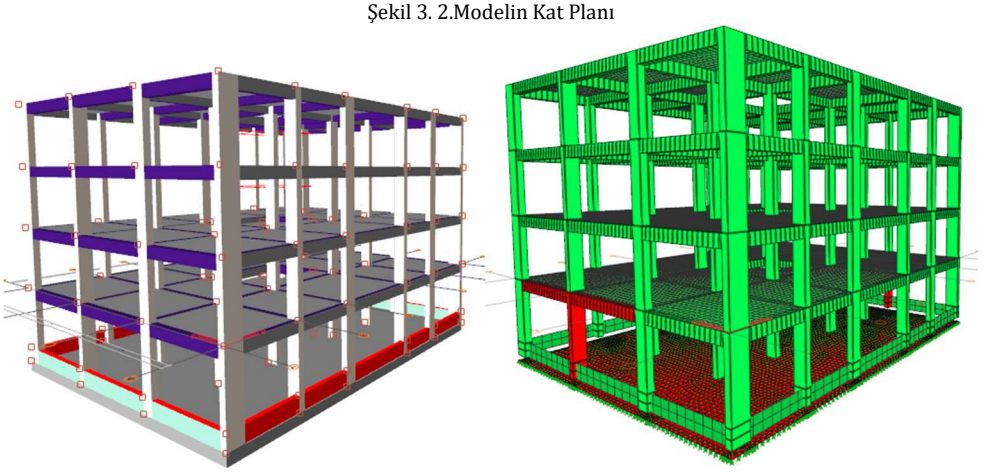
Analizler Deprem yer hareketi düzeyi DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 ve tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi) ve yerel zemin sınıfı ZC (Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar) esas alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, Şekil 1' de planı gösterilmiş olan yapı tasarlanarak bu yapıya kolonlar yerleştirilmiştir. Mimari tasarım da referans olarak kullanılacak yapı modeli için kolonlar 2018 Deprem yönetmeliğine uygun ve binada "x" ve "y" yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde tarafımızca yönetmelik şartları ile "x ve y"

yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilen kolonların olduğu bina modeli Referans bina modeli olarak alınmış, analiz edilmiş ve maliyet hesapları yapılmıştır.

Tarafımızca nizami olarak projelendirilen ve kolonları yerleştirilen bina modelinin deprem etkisi altında ki analiz sonuçlarının tamamı referans olarak alınmıştır. Bu aşamadan sonra tarafımızca oluşturulan referans proje sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek için projede tarafımızca yerleştirilen kolonların tamamı kaldırılarak sadece aksları olan 2 tane hiç kolon olmayan yeni modeller oluşturulmuştur. Sadece aksları olan bu iki yeni model bina planına piyasa da proje yapan bir mimar ve bir inşaat mühendisinden kolon yerleştirmeli istenmiştir. İnşaat mühendisinin oluşturduğu modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin tamamında 24 kolon bulunmaktadır. Kolonları inşaat mühendisi tarafından yerleştirilen bina modelinin planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

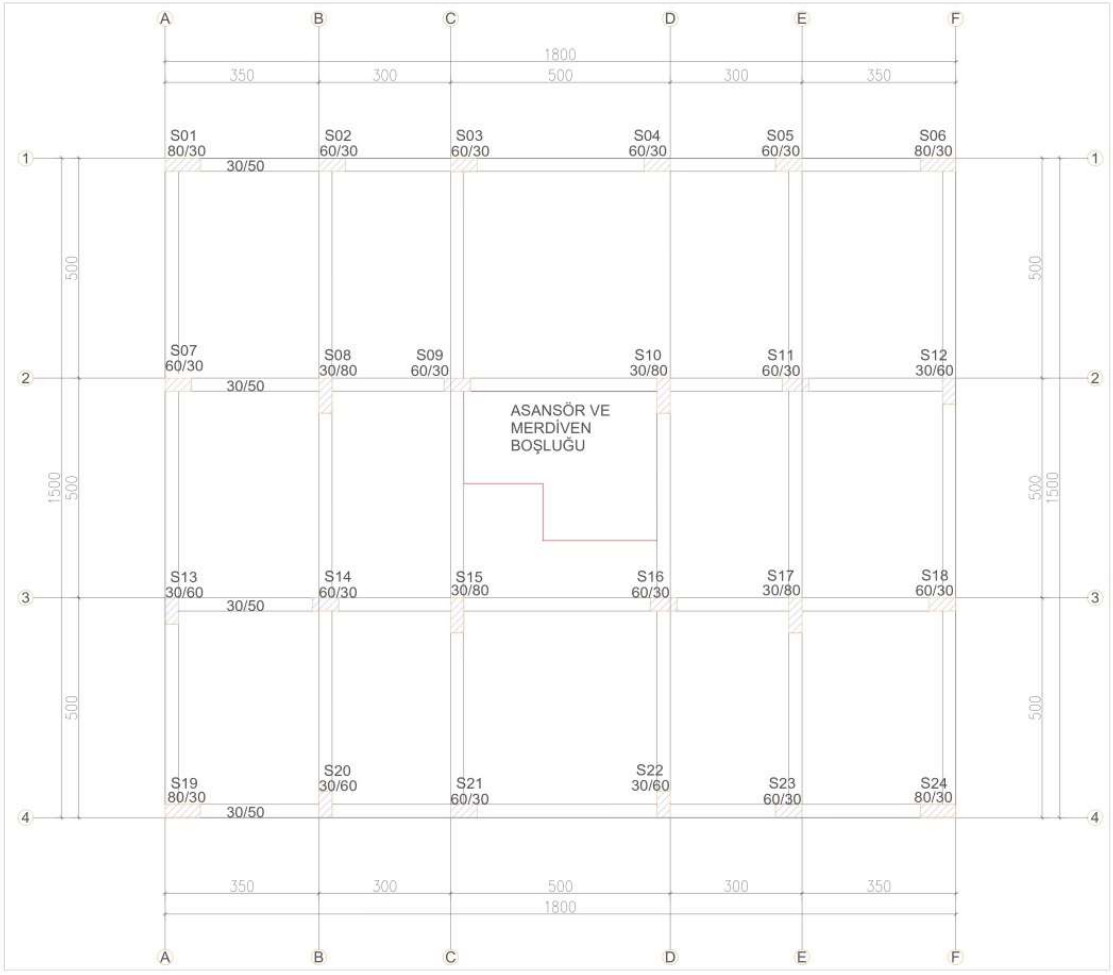


Şekil 3. 2.Modelin Kat Planı

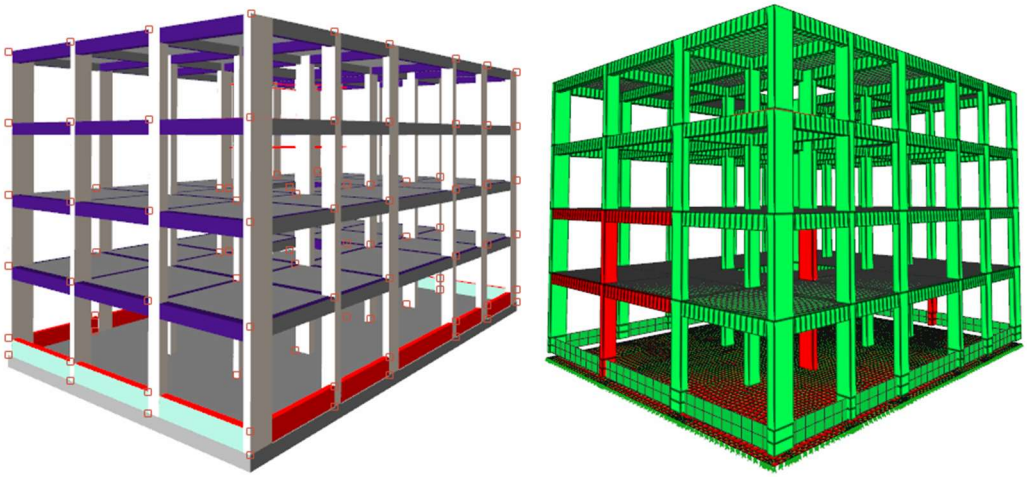


Şekil 4. Oluşturulan 2. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Sadece aksları olan ve mimar tarafından kolonları yerleştirilen model binada ise “x” yönünde toplam 16 (yatay) ve “y” yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir. Mimar tarafından oluşturulan bina modelinin planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 5. 3. Modelin Kat Planı



Şekil 6. Oluşturulan 3. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Tarafımızca nizami olarak kolon yerleşimi yapılan ve Referans olarak alınan bina modelimiz ile birbirinden bağımsız olarak kolon yerleşimi yapılan 3 farklı bina modelinde kolon yönlerinde ki değişimlerin binada oluşan metraj değerleri çok yönlü karşılaştırılmıştır. Oluşturulan bina modellerinin metraj analizleri ideCAD paket programı ile yapılmıştır. Metraj analizinde, "Kalıp metrajı", inşaat ve mimarlık alanlarında kullanılan bir terimdir. Bir yapı projesinin inşaatında kullanılacak olan kalıp miktarını belirtir. Kalıp, genellikle betonarme yapıların dökülmesinde kullanılan ahşap, metal veya plastik

yapıdır. Kalıp metrajı, proje üzerinde belirtilen her bir kalıp elemanının uzunluk, genişlik ve yükseklik gibi ölçülerinin toplamını ifade eder. Bu metraj, inşaat projelerinin maliyet hesaplamalarında ve kaynak planlamasında önemli bir rol oynar. Oluşturulan 3 model kalıp metrajı esas alınarak karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan farkları daha net görebilmek için modeller katlar ve yapı elemanları olarak ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. (Tablo 1).

Tablo 1. Kalıp Metrajı

Model Binalar	Katlar	Döşeme (m^2)	Kirişler (m^2)	Kolonlar (m^2)
1. Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	210.88	149.36	119.40
	2. Kat	210.88	149.36	119.40
	1. Kat	210.88	149.36	119.40
	Zemin Kat	210.88	149.36	149.92
	Toplam	**843.52**	**597.43**	**508.12**
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	210.94	148.76	123.00
	2. Kat	210.94	148.76	123.00
	1. Kat	210.94	148.76	123.00
	Zemin Kat	210.94	148.76	154.36
	Toplam	**843.76**	**595.03**	**523.36**
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	210.94	147.78	127.80
	2. Kat	210.94	147.78	127.80
	1. Kat	210.94	147.78	127.80
	Zemin Kat	210.94	147.78	160.28
	Toplam	**843.76**	**591.12**	**511.20**

Tasarlanan 3 yapı modelinin kalıp metrajlarının genel toplamı oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Referans modelin 2. ve 3. modelden daha az kalıp metrajına sahip olduğu görülmüştür. (Tablo 2).

Tablo 2. Kalıp Metrajı Genel Toplam

Model Binalar	Genel Toplam	Fark	% Fark
1.Referans Model	2067,19 m^2	0,00 m^2	0,00
2. Model	2080,27 m^2	13,08 m^2	0,632
3. Model	2094,99 m^2	27,80 m^2	1,345

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile kalıp metrajında %0,632 ve %1,345 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok büyük miktarlarda kalıp kullanılması gereken durumlarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Ekonomik faaliyetlerin ve yatırım programlarının çok iyi planlanması gereken özellikle ülkemiz gibi enflasyon oranı oldukça yüksek ve girdi maliyetleri ön görülemez oranda artış gösteren bir durumda bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan 3 yapı modelinin beton metrajları da incelenmiştir. "Beton metrajı", bir yapı projesinde kullanılacak beton miktarını ifade eder. İnşaat projelerinde, betonarme yapıların oluşturulması için kullanılacak olan beton miktarının hesaplanması önemlidir. Beton metrajı, projede yer alan her bir betonarme elemanın (kolonlar, kirişler, perdeler, döşemeler vb.) boyutlarına göre hesaplanır ve bu elemanların beton gereksinimleri toplanarak yapı için genel bir beton metrajı elde edilir. Beton metrajı, proje maliyetinin belirlenmesi ve malzeme tedarikinin planlanması açısından da önemlidir. İnşaat projelerinde beton miktarı, yapı elemanlarının boyutlarına, betonarme tekniklerine ve kalite gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, beton metrajının doğru belirlenmesi inşaat projelerinde başarılı ve verimli bir çalışma için oldukça önemlidir. Oluşturulan 3 modelin beton metrajları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Beton metrajında ortaya çıkan farkları daha net görebilmek için yapı modellerinin katları ve yapı elemanlarının beton metrajları ayrı ayrı gösterilmiştir. (Tablo 3).

Tablo 3. Beton Metrajı

Model Binalar	Katlar	Döşeme (m^3)	Kirişler (m^3)	Kolonlar (m^3)
1.Referans Model	3. Kat	31.632	21.030	13.320
	2. Kat	31.632	21.030	13.320
	1. Kat	31.632	21.030	13.320
	Zemin Kat	31.632	21.030	16.428
	Toplam	**126.528**	**84.120**	**56.388**

2. Model	3. Kat	31.641	20.940	13.680
	2. Kat	31.641	20.940	13.680
	1. Kat	31.641	20.940	13.680
	Zemin Kat	31.641	20.940	16.872
	Toplam	**126.564**	**83.760**	**57.912**
3. Model	3. Kat	31.641	20.820	14.400
	2. Kat	31.641	20.820	14.400
	1. Kat	31.641	20.820	14.400
	Zemin Kat	31.641	20.820	17.760
	Toplam	**126.564**	**83.280**	**60.960**

Tasarlanan 3 yapı modelinin beton metrajının genel toplamı oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Referans modelin 2. ve 3. modelden daha az beton metrajına sahip olduğu görülmüştür. (Tablo 4).

Tablo 4.Beton Metrajı Genel Toplam

Model Binalar	Genel Toplam	Farklar	% Fark
1.Referans Model	411.976 m^3	0,00 m^3	0,00
2. Model	413.176 m^3	1,20 m^3	0,291
3. Model	415.534 m^3	3,558 m^3	0,863

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile beton metrajında %0,291 ve %0,863 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok büyük miktarlarda beton dökülmesi gereken durumlarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Ekonomik faaliyetlerin ve yatırım programlarının çok iyi planlanması gereken özellikle ülkemiz gibi enflasyon oranı oldukça yüksek ve girdi maliyetleri ön görülemez oranda artış gösteren bir durumda bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan 3 yapı modelinin donatı metrajları da incelenmiştir Donatı metrajı, bir yapı projesinde kullanılacak demir donatı miktarını ifade etmektedir. İnşaat sektöründe, betonarme yapıların güçlendirilmesi ve desteklenmesi için kullanılan demir donatıların miktarının hesaplanması önemlidir. Donatı metrajı, projede yer alan her bir betonarme yapı elemanının boyutlarına ve yerleştirilecekleri bölümlere göre hesaplanır. Donatı metrajı hesaplaması, donatı elemanlarının uzunlukları, çapları ve miktarları dikkate alınarak yapılır. Bu bilgiler, projenin detaylarına ve yapı elemanlarının özelliklerine göre belirlenir. Donatı metrajı, inşaat maliyetinin belirlenmesi, donatı malzemelerinin tedarik edilmesi ve montajının planlanması için önemlidir. Donatı metrajının doğru belirlenmesi, yapı maliyetinin doğru hesaplanması, yapının dayanımı ve betonarme elemanlardan beklenen performansı göstermesi vb birçok açıdan kritiktir. Yanlış hesaplamalar, yapısal zayıflıklara veya güvenlik risklerine yol açabilir. Bu nedenle, donatı metrajının doğru bir şekilde hesaplanması, inşaat projelerinin başarılı bir şekilde tamamlanmasında ve inşaat sürecinin yapı ekonomisi açısından da doğru yönetilmesinde önemli bir rol oynar. Oluşturulan 3 yapı modeli donatı metrajı esas alınarak karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan farkları daha net görebilmek için oluşturulan yapı modellerinin donatı metrajları yapı elemanları bazında ayrı ayrı belirlenmiştir. (Tablo 5).

Tablo 5. Donatı Metrajı

Model Binalar	Döşeme (Ton)	Kirişler (Ton)	Kolonlar (Ton)
1.Referans Model	7490.65	7676.78	12844.89
2. Model	7490.65	7614.63	13178.13
3. Model	7490.65	7664.66	13714.43

Tasarlanan 3 yapı modelinin donatı metrajının genel toplamları oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Referans modelin 2. ve 3. modelden daha az donatı metrajına sahip olduğu görülmüştür. (Tablo 6).

Tablo 6. Donatı Metrajı Genel Toplam

Model Binalar	Genel Toplam	Farklar	% Farklar
1.Referans Model	40202,34 ton	0,00	0,00
2. Model	41160,86 ton	958,52 ton	2,384
3. Model	41551,36 ton	1349,02 ton	3,356

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile donatı metrajında %2,384 ve %3,356 oranında artışlar olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok büyük miktarlarda donatı kullanılması gereken projelerde farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır.

Ekonomik faaliyetlerin ve yatırım programlarının çok iyi planlanması gereken özellikle ülkemiz gibi enflasyon oranı oldukça yüksek ve girdi maliyetleri ön görülemez oranda artış gösteren bir durumda %3,5 ten daha fazla oranlarda farkın ortaya çıkıyor olması son derece önemli bir durumdur.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin+3 katlı bir binada farklı kolon yerleşimi yapılan 3 ayrı bina modeli oluşturularak bu model binaların TBDY-2018 yönetmeliğinde belirtilen esaslara göre İdeCAD programı ile performans analizleri yapılmış ve bu 3 model binanın deprem etkisi altında ki davranışları incelenerek karşılaştırılmıştır. Analiz ve değerlendirmeler sonucunda yatay deprem yüklerine maruz kalan kolon ve perde duvar gibi düşey taşıyıcı elemanlar planda x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilirse yapı depreme karşı x veya y yönlerinde aynı davranışı gösterecek ve yapı üzerinde ki deprem etkileri azalacaktır. Ancak bina tasarlanan binalarda yerleştirilen kolon ve perde duvarlar x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmezlerse deprem etkileri binanın Rijitliğinin az olduğu doğrultuda çok büyük hasarlara ve göçmelere neden olacaktır. Oluşturulan referans modelde x ve y doğrultusunda kolonlar eşit olarak yerleştirilmiştir. 2. modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin tamamında 24 kolon bulunmaktadır. 3.modelde de "x" yönünde toplam 16 (yatay) ve "y" yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarından; kalıp, beton ve donatı metrajı bakımından modeller karşılaştırılmıştır. Analizler Katlarla göre ve Döşeme, Kirişler ve Kolonlar olarak tablolar oluşturulmuştur. Daha sonra genel toplamlar karşılaştırılmıştır.

Kalıp metrajı bakımından oluşturulan 3 model ele alındığında kolonlar ve kirişler üzerinde oluşan farklar görülmektedir. Referans modelin kolonlar için gereken kalıp metraj değeri tüm katlarda 508,12 m^2 iken bu değer 2. modelde 523,36 m^2 ve 3. modelde 511,20 m^2'dir. Kalıp metrajı genel toplam olarak ele alındığında ise Referans modelin toplam kalıp metraj değeri 2067,19 m^2 iken bu değer 2. modelde 2080,27 m^2 ve 3. modelde 2094,99 m^2'dir. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile kalıp metrajında %0,632 ve %1,345 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Beton metrajı bakımından oluşturulan 3 model ele alındığında kolonlar üzerinde oluşan farklar görülmektedir. Referans modelin kolonlar için gereken beton metraj değeri tüm katlarda 56.388 m^3 iken bu değer 2. modelde 57.912 m^3 ve 3. modelde 60.960 m^3'dir. Beton metrajı genel toplam olarak ele alındığında ise Referans modelin toplam beton metraj değeri 411.976 m^3 iken bu değer 2. modelde 413.176 m^3 ve 3. modelde 415.534 m^3'dir. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile beton metrajında %0,291 ve %0,863 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Donatı metrajı bakımından oluşturulan 3 model ele alındığında kolonlar üzerinde oluşan farklar görülmektedir. Referans modelin kolonlar için gereken donatı metraj değeri tüm katlarda 12844.89 ton iken bu değer 2. modelde 13178.13 ton ve 3. modelde 13714.43 ton 'dur. Donatı metrajı genel toplam olarak ele alındığında ise Referans modelin toplam donatı metraj değeri 40202,34 ton iken bu değer 2. modelde 41160,86 ton ve 3. modelde 41551,36 ton 'dur. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile donatı metrajında %2,384 ve %3,356 oranında artışlar olduğu görülmüştür.

Referans model bina ve 2 tane de diğer model binalarda proje aynı olmasına rağmen sadece kolonların farklı yerleştirilmeleri nedeni ile binaların kalıp, beton ve donatı maliyetlerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Tarafımızca kolon yerleşimi yapılan bina modelinde söz konusu metrajlar az çıkarken diğer iki binada fazla çıkmıştır. Büyük inşaat projelerinde ve çok büyük miktarlarda kalıp, beton ve donatı kullanılması gereken projelerde sadece kolonların farklı yerleştirilmesi nedeni ile bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Ekonomik faaliyetlerin ve yatırım programlarının çok iyi planlanması gereken özellikle ülkemiz gibi enflasyon oranı oldukça yüksek ve girdi maliyetleri ön görülemez oranda artış gösteren bir durumda özellikle donatı metrajında %3,5 ten daha fazla oranlarda farkın ortaya çıkması göz ardı edilemez bir durumdur.

IV. TARTIŞMA

Analiz sonuçlarına bakıldığında oluşturulan 2. ve 3'ncü modelde binaya etki eden deprem yüklerini karşılamak için kolon boyutlarının büyütülmek zorunda kalınması bu iki modelin metraj sonucunun referans modelden çok daha fazla olmasına neden olmuştur.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı Türkiye gibi deprem kuşağında bulunan bir ülke için çok önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, aynı plan üzerinde farklı yönlerde ve boyutlarda yerleştirilen kolonların yapı maliyetine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bina tasarımı yapan mimar veya inşaat mühendislerinin tasarımda yerleştirdikleri kolonların binanın yapı maliyeti üzerinde ki etkilerini nasıl değiştirdiği oluşturulan 3 bina modelinin ideCAD programı ile analiz edilmesi sonucunda ortaya konulmuştur.

V. ÇIKARIM

Bu sonuçlara göre binaların mimari tasarımı safhasında kolonların mimar ve mühendisler tarafından yeterli boyutlarda ve doğru yerleştirilmesi durumunda yapı maliyetinin önemli düzeyde azaldığı gösterilmiştir. Bu sayede taşıyıcı sistem tasarımında kolon yerleşiminin doğru yapılması, tasarım safhasında ki hataların en aza indirilmesi ile deprem açısından daha güvenilir, depreme daha dayanıklı yapılar tasarlanabileceği, böylece deprem risklerinin azaltılarak can ve mal güvenliğinin sağlanabileceği, ekonomik kayıpların azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Alkan, Abdullah. Çok katlı konut yapılarında kullanıcıya özelbir planlama denemesi (Panoroma apartmanı örneği). MS thesis. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, 2019.

[2] Varol, K. O. Ç. "Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi." Çanakkale onsekiz mart üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi 2.1 (2016): 36-57.

[3] Albakour, Amr & Ipek, Cengiz. (2023). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı.

[4] Bikçe, M. (2017). Taken and Need to Take Precautions in Turkey's Earthquakes . International Journal of Engineering Research and Development , 9 (2) , 24-31 . DOI: 10.29137/umagd.351464

[5] Cevher, M. , Keçeli, A. "Zemin Hakim Periyodu ve Bina Yüksekliği Rezonans İlişkisi" . Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi 17 (2018): 203-224 https://dergipark.org.tr/tr/pub/uybd/issue/41586/463982

[6] Alpaslan, N. (2013). Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması . Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi , 3 (2) , 67-89 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/buyasambid/issue/29820/320770

[7] Şimşek Şengül, Ü. (2023). Deprem Etkisi Altında Yapıların Yatay Ve Düşey Doğrultudaki Düzensizliklerinin İncelenmesi . TÜRKAV Kamu Yönetimi Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi , 3 (4) , 215-231 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkav/issue/77993/1283428

[8] Koçak, Serdar. "İnşaat projelerinde kazanılmış değer analizi ile Primavera P6 destekli maliyet kontrolü ve bir uygulama." (2018).

[9] ZAFER, ENES HAKAN. "Yapı bilgi modeli ile minimum zayiatla yer karosu ve kalıp işlerinin imalatı." (2021).

[10] Son, Süleyman. Uluslararası endüstriyel projelerde bütçe planlama. MS thesis. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09March2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Beyin Tümörü Tespiti İçin Beyin MRI Görüntülerinin Derin Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Analiz Edilmesi

Fikri YILMAZ [a], Prof. Dr. Kemal POLAT[b], Doç. Dr. Nihat DALDAL[c]*

[a]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bolu/Türkiye.
[b]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bolu/Türkiye. kpolat@ibu.edu.tr
[c]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bolu/Türkiye. nihatdaldal@ibu.edu.tr
***Sorumlu Yazar: fkrylmz@gmail.com**

ÖZET

Beyin tümörü beynin normal işlevselliğini etkileyerek merkezi sinir sistemi üzerinde ciddi bozulmalara sebep olabilir. Erken tanı bu sağlık sorunuyla başa çıkmada önem arz etmektedir. Tümör tespitinde Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) öne çıkan yaklaşımdır. Uzmanların MRG tekniğinden üst seviyede bilgi sahibi olması, bilgisayarlı görüntü işleme yöntemlerinden faydalanması ile gerçekleşecektir. Bu da derin öğrenme yaklaşımıyla mümkün olmaktadır. Bu çalışmada beş farklı derin öğrenme mimarisi, kaggle sitesinden elde edilen MRG veri setinden faydalanılarak test edilmiştir. 98 tümörsüz MRG görüntü ve 155 tümörlü MRG görüntü olmak üzere toplam 253 MRG görüntü üzerinde çalışma yapılmıştır. Veri setini derin öğrenme modellerine uygulamadan önce, yapılan işlemler sayesinde, görüntü sayısı 500 tümörlü ve 500 tümörsüz olmak üzere toplam 1000 görüntü elde edilmiştir. Uygulanan bu farklı derin öğrenme modellerinden InceptionV3 modeli, eğitim ve test doğruluğu oranı bakımından, uygulanan diğer dört modele kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: *beyin tümörü, CNN, derin öğrenme, InceptionV3, VGG16.*

Analyzing Brain MRI Images for Brain Tumor Detection Using Deep Learning Algorithms

ABSTRACT

A brain tumor can significantly impair the normal functionality of the brain, leading to serious disruptions in the central nervous system. Early diagnosis is crucial in dealing with this health issue. Magnetic Resonance Imaging (MRI) stands out as the primary approach for tumor detection. Expertise in MRI technique, coupled with utilization of computer vision methods, is achieved through a deep learning approach. In this study, five different deep learning architectures were tested using MRI data obtained from the Kaggle website. A total of 253 MRI images were worked on, consisting of 98 tumor-free and 155 tumor-present MRI images. Prior to applying the dataset to deep learning models, preprocessing steps resulted in a total of 1000 images, with 500 tumor-present and 500 tumor-free images. Among the various deep learning models applied, the InceptionV3 model yielded better results in terms of training and testing accuracy compared to the other four models employed.

Keywords: *brain tumor, CNN, deep learning, InceptionV3, VGG16.*

I. GİRİŞ

Beyin tümörü; hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalıp büyümesi sonucunda beyinde meydana gelen anormal doku kümesidir[1]. Tümör beynin normal işlevselliğini etkileyerek merkezi sinir sistemi üzerinde ciddi bozulmalara sebep olabilir. Beyin tümörleri yeni doğandan başlayarak her yaşta görülebilir. Bir tümör ne kadar erken tanı alırsa tedavi şansı daha çoktur. Geleneksel yöntemlerle yapılan tanı yerine artık yapay zeka tabanlı yazılımlar ön plana çıkmaktadır. Beyin tümörünün tespitinde

genellikle Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG), bilgisayarlı tomografi ve stereotaktik biyopsi yöntemleri kullanılmaktadır [2]. MRG yöntemiyle elde edilen görüntüler sayesinde uzmanlar tümörü tespit ederek gelişimini takip edebilmektedir. Fakat insan faktörü MRG ile elde edilen görüntülerin doğru bir şekilde değerlendirilmesini olumsuz etkilemektedir. Teknolojinin gelişimiyle birlikte MRG görüntülerinin analiz edilmesi kolaylaşmıştır.

Derin öğrenme, oluşturulan algoritmalar ve yaklaşımlar sayesinde tıp, robotik, ses ve görüntü işleme gibi pek çok alanda akıllı çözümler sunmaktadır. Derin öğrenme, Manyetik Rezonans Görüntüleme ile elde edilen görselleri işleyerek insan faktörü etkisini ortadan kaldırır. Bu sayede hastalığın tespiti ve takibi için uzmanlara daha gerçekçi bilgiler sunar.

Yapılan literatür taramasında, Bulut ve arkadaşları [3] beyin tümör tespiti için MRG görüntülerinin segmantasyonuna dayalı bir model önerdiler. Deneysel çalışmalarda Markov rastgele alan yöntemi ile %87 doğrulukta beyin tümörlerini tespit etmişlerdir.

Aslan yaptığı çalışmada [4], MRG görüntüleri ile beyin tümörlerinin tespiti için MobilNetV2 derin öğrenme modeli ile birlikte k-en yakın koşu algoritmasını kullanmıştır. Önceden eğitilmiş MobileNetV2 modelinin tam bağlantı katman değerlerini kullanarak tümör tespitinde %96,5 doğruluk skoruna ulaşılmıştır.

Beyin tümör bölütlemesi yapılan çalışmalar da mevcuttur. Pereira ve arkadaşları [5] çalışmasında 3x3 Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network, CNN) kullanarak bölütleme yapmışlardır.

Saxena P. Ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [6], önceden öğretilmiş üç farklı model kullanarak beyin MR görüntülerini sınıflandırmak için Transfer Öğrenme Tabanlı Convolutional Neural Network (CNN) yaklaşımını gerçekleştirmişlerdir. Resnet-50 modelinin en yüksek doğruluk oranına ulaştığını (%95) belirtmişlerdir. VGG-16 doğruluk oranı %90 ve Inception-V3 modelinin doğruluk oranı ise %55 olarak tespit etmişlerdir.

Shahzadi I. Ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [7], CNN'lerin 3D hacimsel sınıflandırmada optimize edilmesinin zor olduğunu belirtmişler. CNN ve Long Short Term Memory (LSTM) Ağı'nı içeren bir kademeyi tanıtarak bu problemi aştıklarını ve sınıflandırma açısından VGG-16'dan alınan özelliklerin, AlexNet ve ResNet'ten alınan özelliklere kıyasla daha iyi doğruluğa ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Vani N. Ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [8], beyin tümörlerinin tespiti ve sınıflandırılması için Support Vector Machine (SVM) algoritmasını geliştirmişlerdir. SVM'lerle nesne tespiti için sunulan bu prototip ile %82 doğruluk elde etmişlerdir.

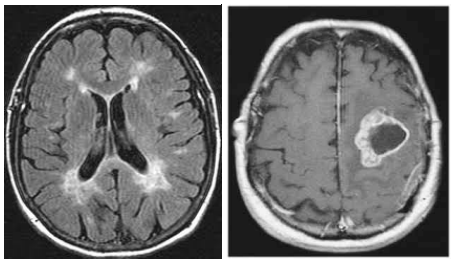
P. Afshar ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada CNN'lerin büyük miktarda eğitim verisine ihtiyaç duyduklarını ve giriş dönüşümlerini düzgün bir şekilde işleyemediklerini belirtmişler. CNN'lerin bu sınırlılıklarını Capsule networks (CapsNets) makine öğrenme mimarisiyle aştıklarını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada tümör sınıflandırma probleminde CNN'lerin önüne geçmişlerdir.

Mohsen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [10], beyin MRG'lerini normal ve üç farklı türde tümör olarak sınıflandırmak için discrete wavelet transform (DWT) ile Deep Neural Network (DNN) kombinasyonunu kullanarak etkili bir yöntem önerdiler.

Doğan ve arkadaşları [11], beyin MRG görüntülerinin analizinde dört aşamalı bilgisayar destekli tespit sistemi geliştirmiş ve REMBRANDT veri setiyle değerlendirmişlerdir. Karar ağaçları ile %93,36, yapay sinir ağları ile %94,89, K-en yakın komşu ile algoritması ile %96,93 ve Meta-Learner algoritması ile %96,93 doğruluk oranlarını elde etmişlerdir.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada Kaggle sitesinde bulunan veri seti kullanılmıştır. Veri seti içerisinde tümörlü (yes) ve tümörsüz (no) olarak ayrı görseller bulunmaktadır. Bu veri seti kullanılarak tümör tespiti yapılmıştır. Tümörlü ve tümörsüz MR görüntüsü örneği Şekil 1'de verilmiştir [12].

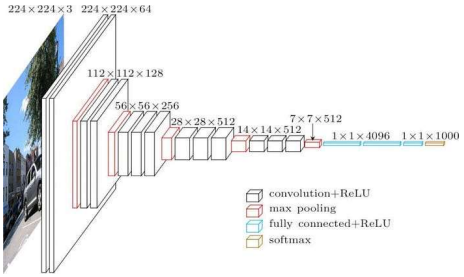


Şekil. 1. Tümörsüz ve tümörlü beyin MR görüntüsü

MRG görüntülerini analiz etmek için beş farklı derin öğrenme algoritmaları kullanılmıştır.

A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition(VGG-16)

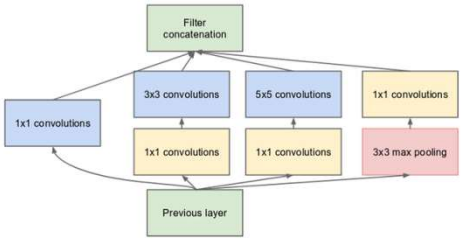
VGG-16, Oxford Üniversitesi'ndeki Visual Geometry Group (VGG) tarafından 2014 yılında geliştirilen bir evrişimli sinir ağı (CNN) modelidir. Model ismini 16 katman içermesinden almıştır. Girdi katmanında yer alacak görüntü 224x224x3 boyutundadır. 13 evrişim katman sayısına sahiptir ve her birinde 3x3 filtre kullanır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU (Rectified Linear Unit) kullanılır. Şekil 2'de VGGNet mimarisi gösterilmiştir [13].



Şekil. 2. VGGNet mimarisi

B. Inception

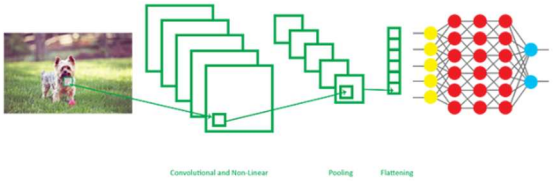
Inception, Google tarafından 2014 yılında geliştirilen bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) mimarisidir. Farklı boyuttaki filtreleri ve evrişim katmanlarını birleştirerek daha derin ağlar oluşturmayı amaçlar. Şekil 3'de Inception mimarisi gösterilmiştir [14].



Şekil. 3. Inception mimarisi

C. Convolutional Neural Network (CNN)

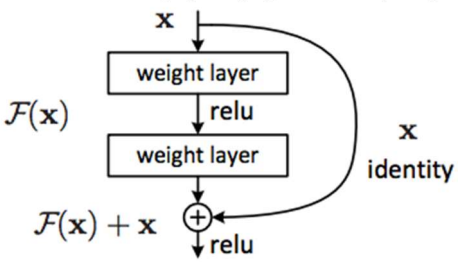
Görüntü işleme görevlerinde başarıyla kullanılan bir yapay sinir ağı mimarisidir. CNN görüntüyü çeşitli katmanlarla işler. Bunlar; özelliklerin saptandığı Convolutional Layer, doğrusal olmayanlığın tanıtıldığı Non-Linearity Layer, Ağırlık sayısının azaltılarak ve uygunluğun kontrol edildiği Pooling Layer, klasik sinir ağı için verileri hazırlayan Flattening Layer ve sınıflamada kullanılan Fully-Connected Layer katmanları vardır. Şekil 4'de CNN mimarisi gösterilmiştir [15].



Şekil. 4. CNN mimarisi

D. Residual Network (ResNet)

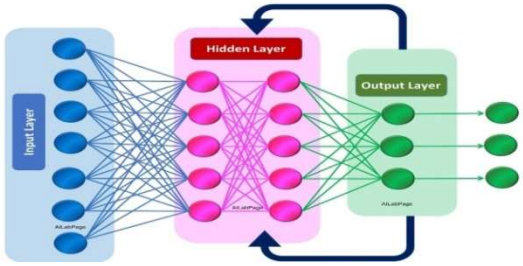
ResNet, Microsoft Research tarafından geliştirilen bir derin öğrenme modelidir. Derin sinir ağların eğitimini daha etkili hale getirir. Derin sinir ağlarının eğitiminde oluşan kayıpların azaltılması amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 5'de ResNet mimarisinin bir yapı taşı gösterilmiştir [16].



Şekil. 5. ResNet mimarisi

E. Recurrent Neural Network (RNN)

RNN, ardışık verilerin işlenmesi için tasarlanmış bir yapay sinir ağı türüdür. RNN eğitilirken bir önceki veriye ait bilgileri de hafızasında tutarak kendini diğer modellerden farklılaştırır. Sonuca eski ve yeni bilgileri karşılaştırarak ulaşır. Şekil 6'de RNN mimarisi gösterilmiştir [17].



Şekil. 6. RNN mimarisi

F. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada beş farklı derin öğrenme mimarisi test edilmiştir. Kaggle veri setinde 98 tümörsüz görüntü ve 155 tümörlü görüntü bulunmaktadır. Bu görüntüler çeşitli farklı piksel boyutlarına sahiptir. MRG görüntüleri 224x224 piksel boyutlarında yeniden düzenlendi. Görüntü verileri üzerinde crop işlemi uygulanarak veriler arttırıldı. Veri seti dataaugmentation ile her sınıfta 500 olmak üzere toplam 1000 görüntüye çıkarılmış oldu. Yapılan arttırma işleminden sonra veri seti jpeg formatında yeniden kaydedildi.

Kullanılan eğitim parametrelerinden epoch, eğitim veri setinin tamamının model tarafından bir kez kullanılmasını ifade eder. Veri seti üzerinden belirli bir sayıda epoch geçirilerek modelin eğitimi tamamlanır. Uygulanan model, veri setini birden çok kez gördükçe daha iyi öğrenme yeteneğine sahip olur. Ancak, çok fazla epoch kullanmak aşırı uymaya (overfitting) yol açabilir, yani model eğitim verilerine çok iyi uyum sağlar ancak genelleme yeteneği azalır.

Epoch sayısı, seçilen modelin eğitimi aşamasında belirlenen bir parametredir ve modelin ne kadar süre boyunca eğitileceğini söyler. Optimal epoch sayısı deneme yanılma yoluyla belirlenir. Epoch sayısı, aynı zamanda eğitim süresini ve bilgi işlem kaynaklarının kullanımını etkiler. Yapılan bu çalışmada epoch sayısı 20 olarak belirlenmiştir.

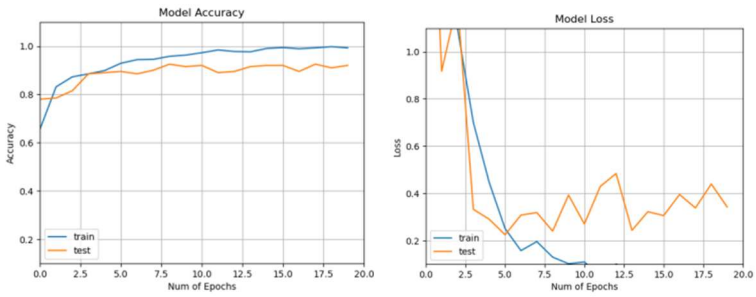
Bir seferde işlenen örnek sayısını Batch Size belirtir. Küçük batch size değerleri genellikle bellek kullanımını azaltır ve daha hızlı güncellemeler sağlar. Büyük batch size değerleri ile daha hızlı eğitim sağlanmaktadır. Optimal batch size değeri kullanılan modelin yapısına ve veri setinin boyutuna bağlı olarak deneme yanılma yöntemiyle 10 olarak kullanıldı.

Görüntü boyutları 224x224 piksel boyutlarında ve görüntü kanal sayısı 3 renk (RGB) olarak ayarlandı. Toplam MRG görüntü sayısı 1000 olmakla beraber bunlardan 800 adet görüntü modelin eğitimi için ve 200 adet görüntü ise kullanılan modelin testi için ayrılmıştır.

Eğitim doğruluğu oranı derin öğrenme ve makine öğrenmesi modellerinin eğitim sürecinde modelin eğitim veri seti üzerinde ne kadar iyi performans gösterdiğini ifade eder. Veri setindeki örnekleri doğru bir şekilde sınıflandırma oranını belirtir. Doğru tahmin sayısının toplam örnek sayısına oranı eğitim doğruluğunun hesaplanması için kullanılır. Bu oran genellikle yüzde olarak ifade edilir.

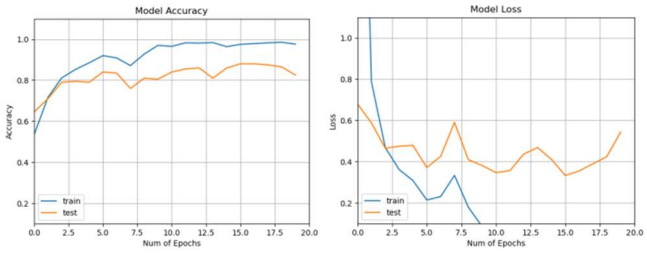
Test doğruluğu, modelin görmediği, eğitim sırasında kullanılmayan bir veri seti üzerinde ne kadar iyi performans gösterdiğini ifade eder. Matematiksel olarak test doğruluğu, doğru tahmin edilen örneklerin toplam örnek sayısına oranını belirtir. Genellikle yüzde olarak ifade edilir.

Veri setine InceptionV3 modeli uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Training Accuracy: 99.75%
TestingAccuracy: 92.00%



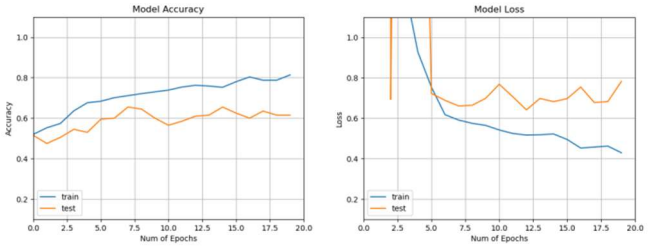
Şekil. 7. InceptionV3 Modeli a) Model Doğruluğu b) Model Kaybı

Veri setine VGG16 modeli uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Training Accuracy: 99.62%
TestingAccuracy: 82.50%



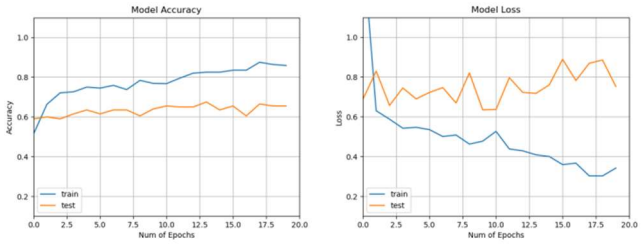
Şekil. 8. VGG16 a) Model Doğruluğu b) Model Kaybı

Veri setine ResNet34 modeli uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Training Accuracy: 81.38%
TestingAccuracy: 65.50%



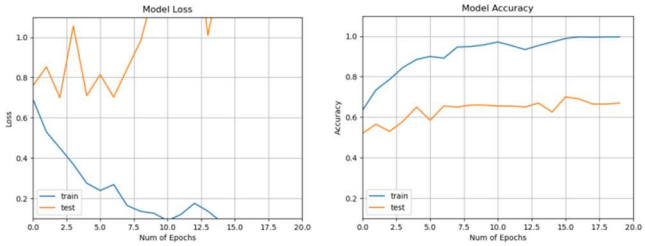
Şekil. 9. ResNet34 Modeli a) Model Doğruluğu b) Model Kaybı

Veri setine CNN modeli uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Training Accuracy: 82.13%
TestingAccuracy: 65.50%



Şekil. 10. CNN Modeli a) Model Doğruluğu b) Model Kaybı

Veri setine RNN modeli uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Training Accuracy: 99.37%
TestingAccuracy: 70.00%



Şekil. 11. RNN Modeli a) Model Doğruluğu b) Model Kaybı

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada beş farklı derin öğrenme mimarisi test edilmiştir. Kaggle sitesinden elde edilen veri setinde 98 tümörsüz MRG görüntü ve 155 tümörlü MRG görüntü olmak üzere toplam 253 MRG görüntü üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu görüntüler çeşitli farklı piksel boyutlarına sahiptir. MRG görüntüleri çeşitli işlemlerden geçirilerek derin öğrenme modellerine uygulanacak biçime dönüştürülmüştür. RNN'ler

genellikle sıralı verilerle (zaman serileri, metin gibi) çalışmak için kullanılır ve görüntü sınıflandırma görevleri için uygun değillerdir. Bu nedenle, görüntüleri bir sıra halinde düzenlemek için TimeDistributed kullanılmıştır. InceptionV3 modeli uygulanan diğer modellerden eğitim ve test doğruluğu oranı bakımından öne çıkmaktadır.

Veri setinin uygulandığı derin öğrenme modellerine ait sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Uygulanan Modellerin Karşılaştırılması

Uygulanan Derin Öğrenme Modelleri	Training Accuracy (%)	Testing Accuracy (%)
InceptionV3	99.75	92.00
VGG16	99.62	82.50
ResNet34	81.38	65.50
CNN	82.13	65.50
RNN	99.37	70.00

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada MRG görüntülerinden, yüksek seviyede özelliklerin etkin bir şekilde çıkarılmasını sağlayarak görüntülerin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda beş farklı derin öğrenme modeli uygulanmış ve elde edilen çıktılar karşılaştırılmıştır. InceptionV3 modeli diğer benzer modellere kıyasla oldukça hafif ve hızlıdır. InceptionV3 modeli, uygulanan diğer modellerden farklı olarak "Inception" modüllerini içerir. Bu sayede modelin özellik çıkarma kapasitesi artar ve modeli daha etkili hale getirir.

V. ÇIKARIM

Beyin tümörü tespitinde MRG yöntemiyle elde edilen bilgilerin analiz edilmesini kolaylaştıracak derin öğrenme algoritmalarından InceptionV3 modeli görüntü sınıflandırma, nesne tespiti görüntü segmentasyonu gibi çeşitli görevlerde başarıyla kullanılmış ve bu çalışmada etkili sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

KAYNAKLAR

[1] M. Arbane, R. Benlamri, Y. Brik and M. Djerioui, "Transfer Learning for Automatic Brain Tumor Classification Using MRI Images," 2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH), Boumerdes, Algeria, 2021, pp. 210-214, doi: 10.1109/IHSH51661.2021.9378739.

[2] Kapoor L, Thakur S. In:7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering - Confluence;12- 13 January 2017; Nodia, India: IEEE. pp. 582-585.

[3] Bulut F, Kiliç I, Ince I. F. Beyin Tümörü Tespitinde Görüntü Bölütleme Yöntemlerine Ait Başarımların Karşılaştırılması ve Analizi. Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik. 2018; 20:173–186.

[4] ASLAN M. Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2022;34(1):399-407.

[5] S. Pereira, A. Pinto, V Alves and C. A. Silva. "Brain tumor segmentation using convolutional neural networks in MRI images". IEEE transactions on medical imaging, 35(5), 1240-1251. 2016.

[6] Saxena P, Maheshwari A, Tayal S, Maheshwari S. Predictive modeling of brain tumor: A Deep learning approach. Advances in Intelligent Systems and Computing 2019; 1189: 275–285.

[7] Shahzadi I, Tang T. B, Meriadeau F, Quyyum A. CNN-LSTM: Cascaded framework for brain tumour classification. IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences, IECBES; 3-6 December 2018; Sarawak, Malaysia: IEEE. pp. 633–637.

[8] Vani N, Sowmya A, Jayamma N. Brain Tumor Classification using Support Vector Machine. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017;4(7):792–796.

[9] P. Afshar, A. Mohammadi ve KN Plataniotis, "Kapsül Ağları aracılığıyla Beyin Tümör Tipi Sınıflandırması", 2018 25. IEEE Uluslararası Görüntü İşleme Konferansı (ICIP) , Atina, Yunanistan, 2018, s. 3129-3133, doi: 10.1109/ICIP .2018.8451379.

[10] Mohsen H, El-Dahshan E. S. A, El-Horbaty E. S. M, Salem A. B. M. Classification using deep learning neural networks for brain tumors, Future Computing and Informatics Journal. 2018; 3(1):68–71.

[11] Dogan, Buket & ÇALIK, Seda & Demir, Önder. (2016). COMPUTER-AIDED DETECTION OF BRAIN TUMORS USING MORPHOLOGICAL RECONSTRUCTION. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering. 21. 257-257. 10.17482/uumfd.270102.

[12] https://www.kaggle.com/datasets/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection (25.12.2023 tarihinde erişim sağlandı.)

[13] https://neurohive.io/en/popular-networks/vgg16/ (09.01.2024 tarihinde erişim sağlandı.)

[14] https://arxiv.org/pdf/1409.4842v1.pdf (12.01.2024 tarihinde erişim sağlandı.)

[15] https://ainews.medium.com/convolutional-neural-network-convnet-yada-cnn-nedir-nas%C4%B1l-%C3%A7al%C4%B1%C5%9F%C4%B1r-50301df8f4ae (09.01.2024 tarihinde erişim sağlandı.)

[16] https://towardsdatascience.com/introduction-to-resnets-c0a830a288a4 (12.01.2024 tarihinde erişim sağlandı.)

[17] https://www.elektrikport.com/makale-detay/yinelemeli-sinir-aglari-(rnn)-nedir/23277#ad-image-0 (09.01.2024 tarihinde erişim sağlandı.)

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Otonom Mobil Robotlar İçin Metasezgisel Yöntemler Kullanılarak Yol Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi Ve Performanslarının Karşılaştırılması

Yunus Tezel[a], Dr. Suat Karakaya[b]*

[a]Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
[b]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
[a*]**Sorumlu Yazar:** yunustezel@gmail.com

[b]suatronik@gmail.com

ÖZET

Son yıllarda mobil robot navigasyonunda kritik bir önem taşıyan yol planlama üzerine çalışmalar yapılmakta ve bu problemi çözmek için metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Mobil robotlar için yol planlama, belirli bir hedefe veya göreve ulaşmak amacıyla engellere çarpmadan en uygun rotayı belirleme sürecidir. Bu süreç mobil robotun bir başlangıç noktasından hedef noktaya en az maliyetle ulaşmasını amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Yol planlama, metasezgisel algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Metasezgisel algoritmalar popülasyon tabanlı ve tek çözüm tabanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Popülasyon tabanlı algoritmalar kendi içinde sürü tabanlı, fizik tabanlı, evrimsel tabanlı, insan tabanlı ve matematik tabanlı olmak üzere beş farklı alt kategoriye ayrılır. Bu çalışma kapsamında yol planlama için üç farklı metasezgisel algoritma kullanılacaktır. Bu algoritmalar; tek çözüm tabanlı olan Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing, SA), popülasyon ve evrimsel tabanlı algoritma olan Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA), popülasyon ve sürü tabanlı olan Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search, CS) algoritmalarıdır. Bu metasezgisel algoritmaların performanslarının karşılaştırılması için ızgara tabanlı farklı senaryolar içeren haritalar oluşturulmuştur. Böylece farklı yol planlama problemlerinde algoritmaların nasıl bir sonuç ürettiği gözlemlenmiştir. Gözlemlerin sonucunda, bu algoritmaların performansları oluşturulan farklı haritalarda test edilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Metasezgisel Algoritmalar, Optimizasyon, Otonom Mobil Robotlar, Yol Planlama*

Development of Path Planning Algorithm For Autonomous Mobile Robots Using Metaheuristic Methods And Comparison Of Their Peformances

Yunus Tezel[a], Dr. Suat Karakaya[b]*

[a]Kocaeli University, Graduate School of Science, Department of Mechatronics Engineering, Kocaeli/Türkiye.
[b]Kocaeli University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Kocaeli/Türkiye.
[a*]**Corresponding Author:** yunustezel@gmail.com

[b]suatronik@gmail.com

ABSTRACT

In recent years, studies have been carried out on path planning, which plays a critical role in mobile robot navigation, and metaheuristic algorithms are used to solve this problem. Path planning for mobile robots is the process of determining the optimal route to reach a specific goal or task without hitting any obstacles. This process is an optimization problem that aims to ensure that the mobile robot reaches the target point from a starting point at the least cost. Path planning can be performed using metaheuristic algorithms.

Metaheuristic algorithms are classified into two categories: population-based and single-solution-based. Population-based algorithms are divided into five different subcategories: swarm-based, physic-based, evolutionary-based, human-based and math-based. Within the scope of this study, three different metaheuristic algorithms will be used for path planning. There are Simulated Annealing (SA) which is a single-solution-based algorithm, Genetic Algorithm (GA) which is a population and evolutionary-based algorithm, and Cuckoo Search (CS) which is a population and swarm-based algorithm. Various grid-based maps with specialized scenarios were created to compare the performance of these metaheuristic algorithms. Thus, the kind of results the algorithms produced in different path planning problems was observed. As a result of the observations, the performances of these algorithms were tested and compared on the maps that were initially designed.

Keywords: *Autonomous Mobile Robots, Metaheuristic Algorithms, Optimization, Path Planning*

I. GİRİŞ

Otonom mobil robotların kullanımı Endüstri 4.0 ile birlikte önem kazanmıştır. Otonom mobil robotlar yük taşıma amacıyla fabrikalarda, depolarda ve ofis ortamlarında tercih edilmeye başlanmıştır [1]. Güvenlik ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda mobil robotların tercihinin önemi artmaktadır. Son yıllarda mobil robotlar, önemli insansız görevleri yerine getirmek için askeri, endüstri ve güvenlik gibi farklı alanlarda başarıyla uygulanmıştır [2].

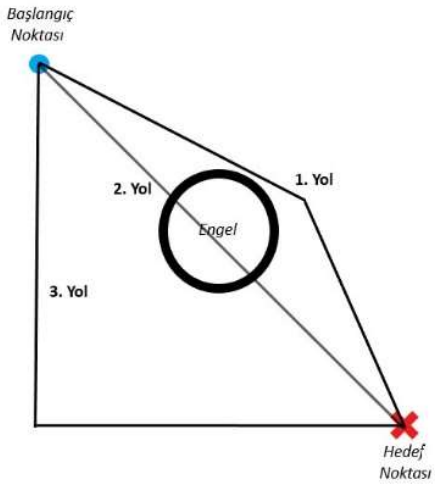
Otonom mobil robot navigasyonu, başlangıç noktasından hedef noktasına engellere çarpmadan ulaşma sürecidir. Bu süreç temel olarak dört bileşenden oluşur [3]:

- Algılama: Mobil robot üzerindeki sensörler aracılığı ile çevre bilgisini toplar.
- Konumlandırma: Mobil robot çalışma uzayındaki konumu tespit eder.
- Kavrama ve yol planlama: Mobil robotun hedef konumuna ulaşması için engellere çarpmadan izleyeceği yolu belirler.
- Hareket kontrol: Mobil robot planlanan yolu gerçekleştirmek için hareketini düzenler.

Otonom mobil robotların navigasyon süreci için gerekli olan bileşenlerden biri de yol planlamadır. 1960'lı yılların ortalarından itibaren yol planlama birçok bilim insanının ilgisini çekmiştir. Mobil robotlar için yapılan iyi bir yol planlama sadece zamandan tasarruf kazandırmaz ayrıca mobil robotun kullanım ömrünü de arttırır ve sermaye yatırımlarını azaltır [4]. Mobil robotlar için yol planlama, belirli bir hedefe veya göreve ulaşmak amacıyla engellere çarpmadan en uygun rotayı belirleme sürecidir. Bu süreç mobil robotun bir başlangıç noktasından hedef noktaya en az maliyetle ulaşmasını amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Yol planlama, karmaşık iç mekan ortamlarında mobil bir robotun otonom bir şekilde gezinebilmesi ve keşif yapabilmesi için çözülmesi gereken en temel problemlerden biridir [5].

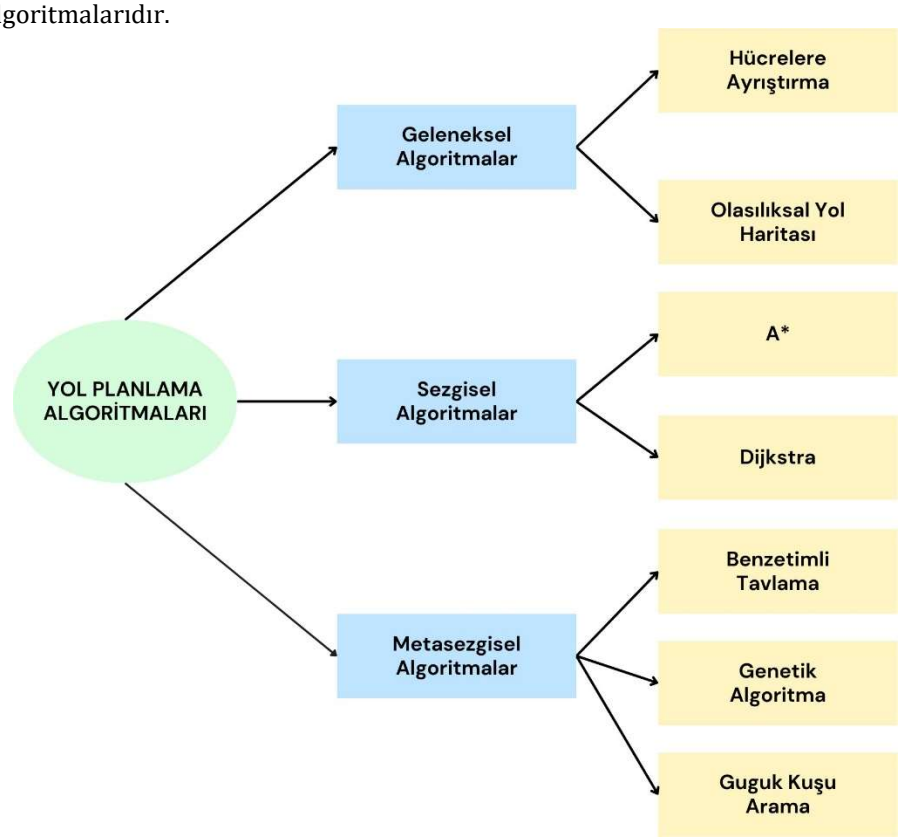
Yukarıda yapılan yol planlama tanımdan anlaşılacağı üzere yol planlama problemi temel olarak engellere çarpmama ve optimum yolu bulma kriterlerini içerir. Bu kriterlere ek olarak algoritmanın çalışma süresi, robotun hedefe ulaşma süresi, robotun harcadığı enerji gibi kriterler eklenebilir. Şekil 1'de bir yol planlama örneği gösterilmiştir. Şekilde üç farklı alternatif yol görülmektedir. 1. Yol'u inceleyecek olursak engele çarpma durumunun olmadığı ve yol uzunluğu açısından uygun bir yol olduğu görülmektedir. 2. Yol aralarındaki en kısa mesafeye sahip olan yol olmasına rağmen engele çarpma durumu olduğu için bu yolun uygun olmadığını söyleyebiliriz. 3. Yol'da ise engele çarpma durumu yoktur ve 1.Yol'la kıyaslandığında engelle arasında daha fazla mesafe bulunduğu için daha emniyetlidir ancak mesafe açısından 1. Yol'a göre 3. Yol daha fazla uzunluğa sahiptir. Buradan anlaşılacağı üzere engele çarpma olmaması bize uygun bir yol verir fakat yol planlama probleminde amacımız problemimize uygun en optimal yolu bulmaya çalışmaktır.

Genel olarak yol planlama, çevreyle ilgili tüm bilgilerin erişilebilir olup olmamasına göre iki kategoriye ayrılabilir. Küresel yol planlamada, çevreye ilişkin tüm bilgiler robot çalışmaya başlamadan önce robot tarafından bilinir. Yerel yol planlamasında ise çevreye ilişkin hemen hemen tüm bilgiler robot tarafından çalışmaya başlamadan önce bilinmemektedir [6]. Yol planlama yaparken çevre içerisinde genellikle iki tür engel vardır: Statik engeller, sabit konumda olan ve hareket etmeyen engellerdir. Statik engellere duvarlar, bariyerler, sütunlar örnek olarak verilebilir. Dinamik engeller, hareket edebilen ve beklenmedik şekilde konumları değişebilen engellerdir. Dinamik engellere insanlar, ortamdaki diğer mobil robotlar, araçlar örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada ortamdaki engeller statik olarak kabul edilmiştir ve çevre bilgisi bilindiği için küresel yol planlama yapılmıştır.



Şekil 1 Yol Planlama Örneği

Yol planlama algoritmalarını Şekil 2'deki gibi geleneksel algoritmalar, sezgisel algoritmalar ve metasezgisel algoritmalar olmak üzere üç sınıfa ayırabiliriz [7]. Son yıllarda mobil robot navigasyonunda kritik bir önem taşıyan yol planlama üzerine çalışmalar yapılmakta ve bu problemi çözmek için metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, insan zekasından veya doğadan ilham alır ve geniş anlamda bir stokastik optimizasyon algoritması olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışma kapsamında yol planlama için üç farklı metasezgisel algoritma kullanılacaktır. Bu algoritmalar; tek çözüm tabanlı olan Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing, SA), popülasyon ve evrimsel tabanlı algoritma olan Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA), popülasyon ve sürü tabanlı olan Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search, CS) algoritmalarıdır.



Şekil 2 Yol Planlama Algoritmaları

Literatürde metasezgisel algoritmalarla yol planlama üzerine birçok çalışma mevcuttur. Gul ve ark. yol planlama için üç aşamadan oluşan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem ilk aşamada Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ve Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimizer, GWO) algoritmalarını hibrit bir şekilde kullanarak en kısa yol mesafesini hesaplar, ikinci aşamada PSO-GWO tarafından üretilen uygun olmayan noktalar Yerel Arama (Local Search) yöntemiyle entegre edilerek uygun

noktalara dönüştürülür son aşamada ise engellerden kaçınma çalışması yapılır [8]. Mohanty ve Parhi statik engeller içeren, bilinmeyen veya kısmen bilinen ortamlarda otonom bir mobil robot için Guguk Kuşu Arama algoritmasını kullanarak bir metodoloji tanımlamışlardır. Önerilen algoritma simülasyon ortamında test edilmiş daha sonra doğrulamak için mobil robot üzerinde testler yapılmıştır [9]. Cong ve Ponnambalam, mobil robot yol planlama problemini çözmek için Karınca Kolonisi Optimizasyon (Ant Colony Optimization, ACO) algoritmasını önermişlerdir. Önerilen ACO ile yol planlama algoritmasını literatürden elde ettikleri haritalar üzerinde test etmişlerdir. Söz konusu makale ile kendi çalışmalarını karşılaştırmışlardır [10]. Amar ve Jasim, çeşitli statik ve dinamik engeller içeren bir ortamda otonom bir mobil robotun küresel yol planlama problemi için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Karınca Kolonisi Optimizasyon algoritmalarını kullanarak dinamik bir ortamta simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra PSO ve ACO algoritmalarının hibrit olarak kullanıldığı bir yöntem önermişlerdir. Algoritmaları karşılaştırdıklarında en optimal yol uzunluğuna ve en kısa çalışma süresine sahip olan algoritmanın PSO-ACO hibrit algoritması olduğunu elde etmişlerdir. Bununla birlikte PSO algoritması ACO algoritmasına kıyasla daha iyi performans göstermiştir [11]. Lin ve ark. depoda çalışacak bir mobil robotun yol planlaması için Benzetimli Tavlama algoritmasından ilham alarak PSO-SA hibrit algoritmasını geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Benzetimli Tavlama, Harmoni Arama (Harmony Search, HS), Ateşböceği Algoritması (Firefly Algorithm, FA), Yapay Arı Kolonisi (Artifical Bee Colony, ABC) ve Genetik Algoritma gibi metasezgisel algoritmalarla karşılaştırmışlardır. PSO-SA hibrit algoritmasının ortalama iterasyon sayısı PSO, SA, HS, FA, ABC ve GA algoritmalarına göre sırası ile %3, %35, %40, %42, %36 ve %44 daha az olarak bulunmuştur. PSO-SA hibrit algoritmasının çalışması süresi her bir algoritma için yine aynı sıra ile %26, %64, %96, %100, %99 ve %99 daha az olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak PSO-SA hibrit algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla hızlı yakınsamaya, yüksek doğruluğa ve daha az çalışma süresine sahip olduğu tespit edilmiştir [12].

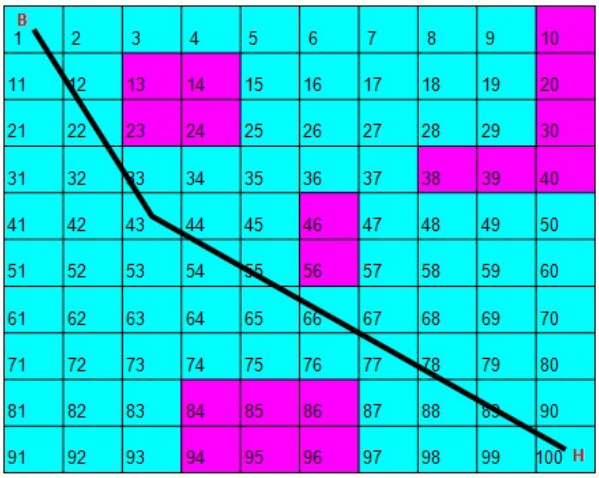
Çalışmanın bölümlerinin sıralaması şu şekildedir: İkinci bölümde materyal metotta, üçüncü bölümde sonuca, dördüncü bölümde tartışmaya ve beşinci bölümde çıkarıma yer verilmiştir.

II. MATERYAL METOT

Bu bölümde ilk önce ızgara tabanlı haritalardan bahsedilip problemin tanımı yapılacaktır. Daha sonra amaç fonksiyonu tanımlanacak ve son olarak çalışmada kullanılan metasezgisel algoritmalar açıklanacaktır.

2.1 Izgara Tabanlı Haritalar

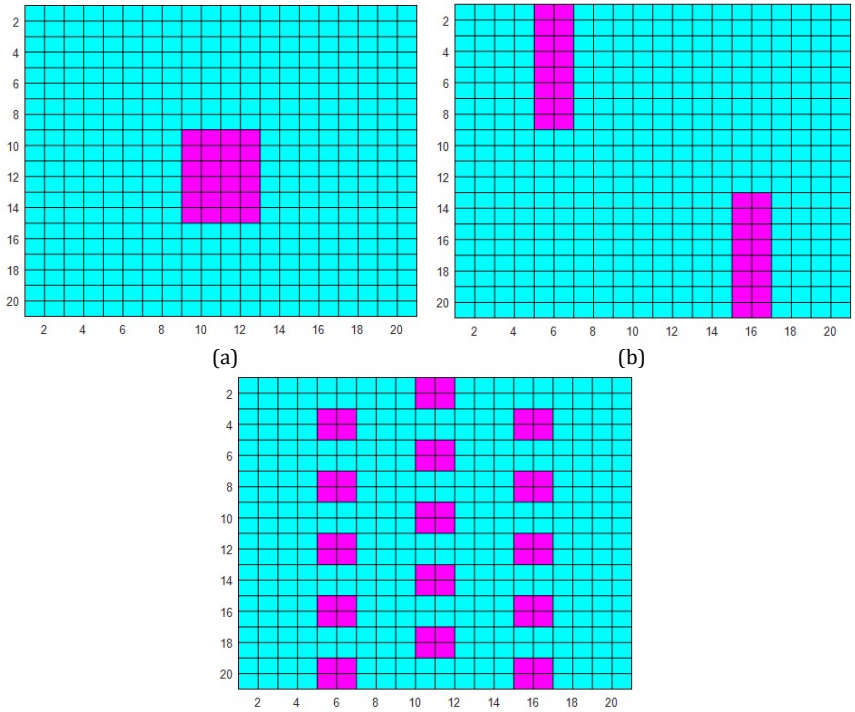
Literatürde nokta tabanlı haritalar, ağ tabanlı haritalar gibi farklı harita türleri bulunmaktadır. Bu çalışmada ızgara tabanlı harita türü kullanılmıştır. Izgara tabanlı haritalar, yol planlama probleminde sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Izgara tabanlı haritalar, belirli bir bölgeyi ızgara formunda temsil eder ve genellik 2 boyutlu bir düzlem üzerine yerleştirilir. Çalışma ortamı ızgara olarak adlandırılan belirli boyutlarda hücrelere bölünerek haritalandırma yapılır. Her bir hücre kendisi hakkında bilgiler içerir. Yol planlama problemi için bu bilgi genellikle engel olup olmama durumudur. Engelli bölgeler dolu alanları veya geçilemez bölgeleri temsil ederken, engelsiz bölgeler serbest geçiş alanlarını temsil eder. Şekil 3'te çalışmada kullanılan ızgara tabanlı harita örneği verilmiştir. Şekilde pembe renkli hücreler engelleri, açık mavi renkli hücreler ise serbest geçiş bölgelerini temsil etmektedir. Robotun başlangıç noktası "B" harfi ile işaretlenen hücre, hedef noktası ise "H" harfi ile işaretlenen hücredir. Yol planlama ile elde edilen yol siyah bir çizgi şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 3 Izgara Tabanlı Harita Örneği

2.2 Problem Tanımı

Metasezgisel yol planlama algoritmalarını karşılaştırmak için daha önce üzerinde çalışılmış üç farklı tipte harita tasarımı seçilmiştir. Tüm haritalarda robot sol üst hücrede başlamakta ve hedef noktası olan sağ alt noktaya ulaşmayı hedeflemektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere haritalar farklı şekilde engeller içeren 20x20 birim boyutunda tasarlanmıştır. Burada ki amaç algoritmaların hangi harita türlerinde iyi sonuç verdiğini tespit etmektir.



Şekil 4 Izgara Tabanlı Haritalar: (a) Harita 1, (b) Harita 2, (c) Harita 3

2.3 Amaç Fonksiyonu

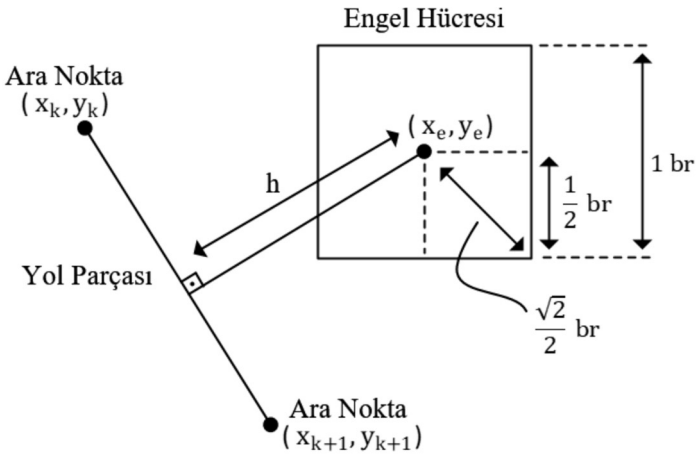
Yol planlama probleminin amacı robotun başlangıç pozisyonu ile hedef nokta arasındaki en uygun yolu bulmaktır. En uygun yol, yolculuk için en kısa, en az zaman alan ve en az enerji gerektiren yol olabilir [13]. Yol planlama probleminde genellikle amaç fonksiyonu engellere çarpmadan hedefe ulaşılabilecek en kısa yol olarak kabul edilir. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$f = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) + ceza, & engel\ varsa \\ \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}), & aksi\ durumda \end{cases} \quad (1)$$

$$d(p_i, p_{i+1}) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (2)$$

Burada, f amaç fonksiyonu, p_i oluşturulan çözüm noktalarından i. nokta, n çözümün boyutu, d iki nokta arasındaki uzunluk, x_i ve y_i robotun mevcut konumunun yatay ve dikey pozisyonu, x_{i+1} ve y_{i+1} robotun bir sonraki konumunun yatay ve dikey pozisyonudur.

İki nokta arası her yol parçasının engelle kesişip kesişmediği kontrol edilir. Her yol parçasının kesiştiği engel sayısı kadar amaç fonksiyonuna ceza puanı eklenir. Engel tespiti için her yol parçasının, engelin bulunduğu hücrenin merkezine olan en kısa mesafesi hesaplanır [14]. Engel tespit yöntemi Şekil 5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5 Engel Tespiti [14]

Şekil 5'te görüldüğü üzere yolun engele olan en kısa mesafesini hesaplamak için bir doğrunun bir noktaya olan en kısa mesafe denkleminden yararlanılmıştır. Bu denklem Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$h = \frac{|(x_{k+1}-x_k)(y_k-y_e)-(x_k-x_e)(y_{k+1}-y_k)|}{\sqrt{(x_{k+1}-x_k)^2+(y_{k+1}-y_k)^2}} \quad (3)$$

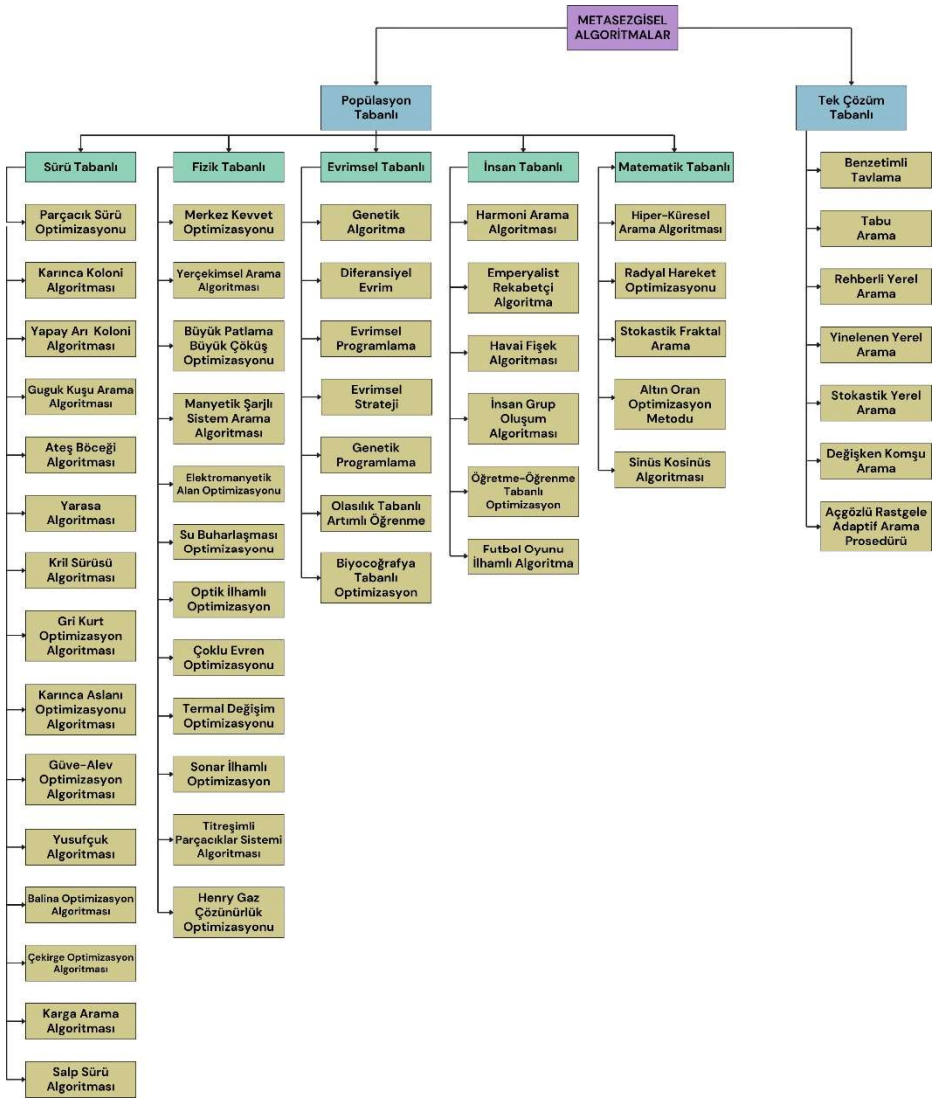
Burada x_k, y_k, x_{k+1} ve y_{k+1} yol parçasının x ve y koordinatlarını, x_e ve y_e engelin bulunduğu hücrenin merkezinin koordinatlarını temsil etmektedir. Engel hücresinin merkez noktasının, engel çevresine olan en uzak mesafesi $\sqrt{2}/2$ birim olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Hesaplanan h değeri, $\sqrt{2}/2$'den küçükse yol parçası ile engel kesişmektedir aksi durumda yol parçası engeli kesmemektedir. Ayrıca sadece $\sqrt{2}/2$ değeri arttırılarak robotun engelden daha uzak bir mesafeden güvenli bir şekilde hareket etmesi sağlanabilir.

2.4 Metasezgisel Algoritmalar

Metasezgisel algoritmalar, insan zekasından veya doğadan ilham alır. Bu tür algoritmalar kesin çözümü garanti etmezler sadece kesin çözüme yakın bir çözümü garanti edebilirler [15]. Metasezgisel algoritmalar farklı şekillerde sınıflandırılır. Gabis ve ark. metasezgisel algoritmaları Şekil 6'daki gibi sınıflandırmışlardır. Bu çalışmada tek çözüm tabanlı algoritmalardan Benzetimli Tavlama, popülasyon tabanlı algoritmalardan, evrimsel tabanlı olan Genetik Algoritma ve sürü tabanlı olan Guguk Kuşu Arama algoritması incelenecektir. Buradaki amaç tek çözüm tabanlı ile popülasyon tabanlı metasezgisel algoritmaları aynı zamanda da popülasyon tabanlı algoritmalar içerisinden sürü tabanlı ve evrimsel tabanlı algoritmaları yol planlama problemi için karşılaştırmaktır.

2.4.1 Benzetimli Tavlama

Benzetimli Tavlama algoritması 1983 yılında Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Algoritma, metallerin tavlama işleminden ilham alınarak optimizasyon problemlerine çözüm sunmuştur. Tavlama işleminde, bir metalin sıcaklığı belirli bir maksimum dereceye kadar arttırılır, daha sonra yavaş yavaş soğutulur eğer soğutma işlemi uygun şekilde yapılırsa güçlü kristal yapı elde edilir. Tavlama işlemi iki adımda gerçekleştirilir: Metal istenilen sıcaklığa kadar ısıtılır, belirli bir sıcaklıkta bir süre tutulduktan sonra yavaş yavaş soğutulur [15].

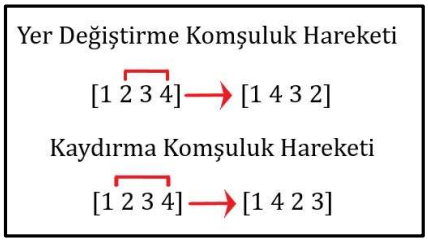


Şekil 6 Metasezgisel Algoritmaların Sınıflandırılması

SA algoritması tek çözüm tabanlı bir algoritmadır ve algoritma rastgele üretilen tek çözüm üzerinden ilerler. Rastgele üretilen çözümler temel olarak üç şekilde aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\textit{İkili Gösterim} \rightarrow [1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1] \quad (4)$$
$$\textit{Tam Sayı Gösterimi} \rightarrow [7\ 3\ 1\ 8\ 13\ 4\ 0\ 41] \quad (5)$$
$$\textit{Gerçel Sayı Gösterimi} \rightarrow [4.7\ 1.2\ 2.4\ 4.8\ 0.7\ 4.4\ 0.1\ 9.1\ ] \quad (6)$$

SA algoritmasında var olan çözüm kullanılarak üretilen yeni çözüm komşu çözüm olarak adlandırılır. Komşu çözüm elde etmek için komşuluk hareketleri kullanılır. Şekil 7'de gösterilen yer değiştirme ve kaydırma komşuluk hareketleri kullanılabilir.



Şekil 7 Komşuluk Hareketleri

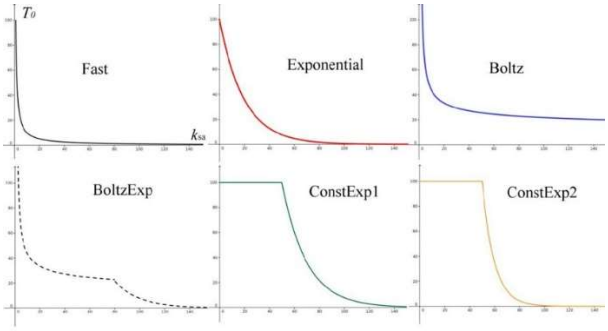
SA algoritmasında yerel minimuma takılmamak için kötü çözümler belirli bir olasılıkla kabul edilebilir. Bu olasılık çözüm ile komşu çözümün maliyetleri arasındaki fark ve sıcaklığa bağlıdır. Olasılık koşulu aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\Delta C = C_i - C_{i-1} \quad (7)$$

$$R < e^{\left(\frac{-\Delta C}{kT}\right)} \quad (8)$$

Burada, ΔC maliyet fonksiyonları arasındaki farkı, C_i komşu çözümü, C_{i-1} var olan çözümü, R sıfır ile bir arasında üretilen rastgele sayıyı, k sabiti ve T sıcaklığı temsil etmektedir. Denklemleri inceleyecek olursak $e^{\left(\frac{-\Delta C}{kT}\right)}$ ifadesi olasılık koşulunu ifade etmektedir eğer rastgele üretilen sayı bu değerden küçük ise komşu çözüm yeni çözüm olarak kabul edilir. Eksponansiyel ifadeyi inceleyecek olursak maliyet fonksiyonları arasındaki fark azaldıkça ve sıcaklık değeri arttıkça komşu çözümün kabul olasılığı artmaktadır.

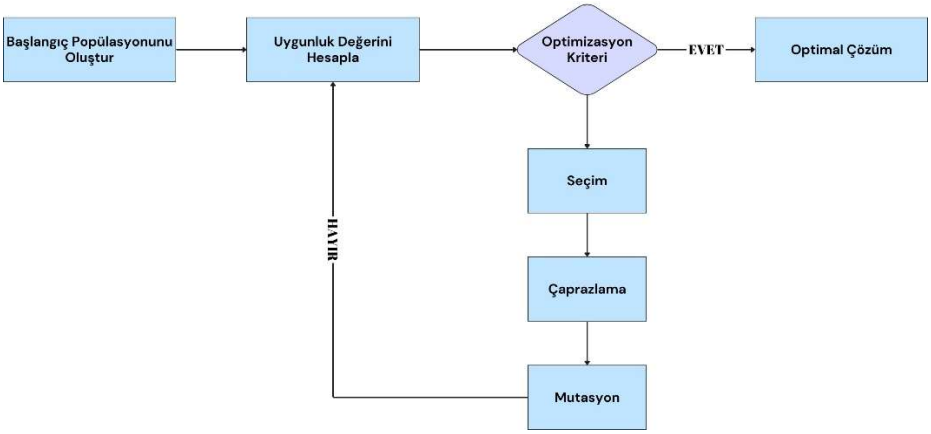
SA algoritmasının performansı sıcaklığa bağlıdır bunun için kullanılan soğutma çizelgesinin seçimi önemlidir. Şekil 8'de kullanılabilecek farkı soğutma çizelgesi örnekleri gösterilmektedir. Ayrıca soğutma işleminde kullanılan başlangıç sıcaklığı, son sıcaklık ve algoritmanın iterasyon sayısının seçimi iyi bir sonuç almak için son derece önemlidir. SA algoritması çözüme arama uzayının rastgele bir noktasından başladığı için başlangıç noktasına bağlıdır.



Şekil 8 Soğutma Çizelgesi Örnekleri [16]

2.4.2 Genetik Algoritma

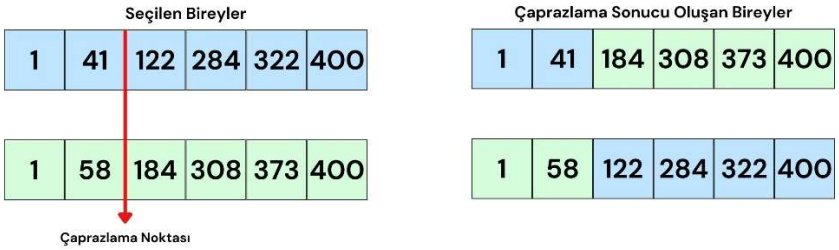
Genetik algoritma 1974 yılında J. Holland ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Darwin'in evrim teorisini temel alır. Genetikte olduğu gibi en iyi olanın hayatta kalması veya güçlünün zayıfı yenmesi felsefesine dayanır [17]. Evrim teorisinde yer alan; üreme, çaprazlama ve mutasyon genetik işlemlerini kullanır. Paralel bir arama yöntemi olduğu için çalışma uzayının tümünde arama yapabilir. Genetik algoritmanın akış diyagramı Şekil 9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 9 Genetik Algoritma Akış Diyagramı

GA'da bütün çözümler popülasyon, tek bir çözüm kromozom veya birey, çözümün her bir değişkeni ise gen olarak adlandırılır. GA en iyi kromozomların bir sonraki nesle aktarılması prensibine dayanır. Bu da seçim işlemi ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada seçim için rulet tekeri yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde ilk önce tüm kromozomların amaç fonksiyonu değeri hesaplanır, amaç fonksiyon değerleri uygunluk değerlerine dönüştürülür ve uygunluk değeri yüksek olan bireylerin seçilme olasılığı daha yüksek olacak şekilde seçim işlemi yapılır.

Çaprazlama işleminde ise seçilen kromozom çiftlerinin özellikleri birleştirilerek yeni kromozomlar elde edilir. Çalışmada kullanılan tek noktalı çaprazlama işlemi Şekil 10'da gösterilmiştir. Mutasyonda ise amaç bireylerin çeşitliliğini arttırmak ve yerel minimuma takılmayı önlemektir. Her bir gen düşük bir olasılık ile mutasyon işlemine uğrar.



Şekil 10 Tek Noktalı Çaprazlama

2.4.3 Guguk Kuşu Arama

2009 yılında X. Yang ve S. Deb tarafından guguk kuşlarının üremelerinden ilham alınarak geliştirilmiştir. Guguk kuşlarının bazı türleri yumurtalarını konak (yabancı) kuşların yuvalarına bırakır. Dişi guguk kuşu yumurtalarını konak kuşun yumurtalarına şekil ve renk açısından benzeyecek şekilde üretir. Böylece kendi yumurtalarının konak kuş tarafından fark edilmesini engellemeye çalışır. Şekil 11'de guguk kuşunun, konak kuşun yuvasına yerleştirdiği benzer yumurtalar görülmektedir.



Şekil 11 Guguk Kuşunun Yerleştirdiği Yumurtalar [18]

Yeni guguk kuşları üretilirken Lévy uçuşundan faydalanılır çünkü birçok hayvan ve böceğin uçuş davranışları Levy uçuşunun tipik özelliklerini sergiler. Yeni çözümlerin üretilmesi:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Lévy(\lambda) \quad (9)$$

$$Lévy \sim u = t^{-\lambda}, (1 < \lambda \leq 3) \quad (10)$$

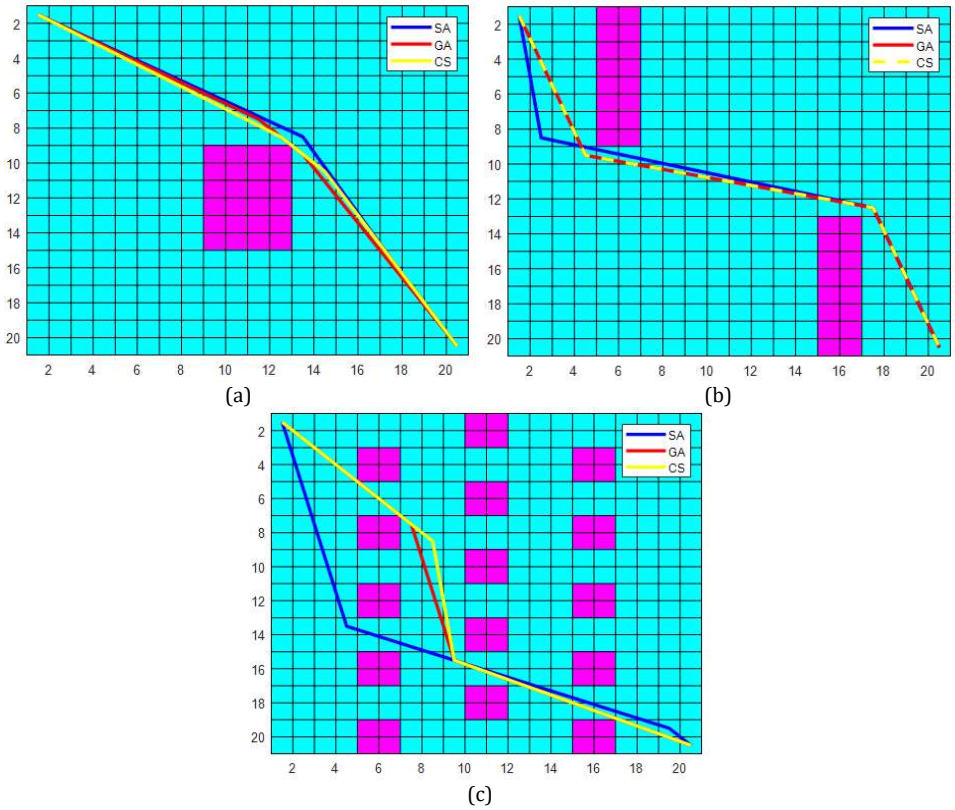
Burada $x_i^{(t+1)}$ yeni çözümü, $x_i^{(t)}$ var olan çözümü, α adım büyüklüğünü (α>0) ve $Lévy(\lambda)$ Lévy uçusunu temsil etmektedir.

Guguk Kuşu Arama algoritmasını basit bir şekilde açıklamak için üç ideal kural kullanılır [19]:

1) Her guguk kuşu her seferde sadece bir yumurta bırakır ve yumurtayı rastgele seçilmiş yuvaya bırakır.
2) Yüksek kaliteli yumurtalara sahip en iyi yuvalar bir sonraki nesle aktarılır.
3) Mevcut ana yuva sayısı sabittir ve guguk kuşu tarafından bırakılan yumurta konak kuş tarafından $p_a \in [0,1]$ olasılığıyla fark edilir. Bu durumda:
    a. Konak kuş, guguk kuşunun yumurtalarını yuvadan atabilir.
    b. Yuvasını terk edip yeni yuva yapabilir.

III. SONUÇLAR

Yol planlama algoritmaları MATLAB 2023b ortamında kodlanmış ve simüle edilmiştir. Kullanılan bilgisayar INTEL CORE i7 işlemciye, 16 GB RAM'e ve Windows 10 Home işletim sistemine sahiptir. Tüm algoritmalarda problem boyutu dört ve ceza puanı 10 olarak alınmıştır. Tüm algoritmalar 50 iterasyon değerinde ve 30 kez çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. GA ve CS algoritmalarının popülasyon sayısı 30 olarak alınmıştır. SA'da başlangıç sıcaklığı 1000, soğutma kat sayısı 0.84; GA'da çaprazlama olasılığı 0.95, mutasyon olasılığı 0.4; CS'de yumurtaların fark edilme olasılığı p_a 0.25, Lévy uçusunda λ değeri 3/2 olarak alınmıştır. Algoritmaların 30 kez çalıştırılması sonucunda elde edilen en optimal yollar Şekil 12'de gösterilmiş ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 12 Elde Edilen En Optimal Yollar: (a) Harita 1, (b) Harita 2, (c) Harita 3

Tablo 1 Simülasyon Sonucu Elde Edilen Sonuçlar (Ort: Ortalama, Std: Standart Sapma)

Yol Planlama Algoritmaları	Harita 1				Harita 2				Harita 3			
	Maliyet			Çalışma Süresi (sn)	Maliyet			Çalışma Süresi (sn)	Maliyet			Çalışma Süresi (sn)
	Ort.	Std.	En iyi		Ort.	Std.	En iyi		Ort.	Std.	En iyi	
SA	28.772	0.9741	27.7857	0.0001	43.2319	8.8826	31.1392	0.0001	44.4287	11.3214	29.939	0.0002
GA	27.7844	0.1026	27.5287	0.0072	31.5461	0.8241	30.4297	0.0076	29.8145	0.4819	28.8145	0.0084
CS	27.7365	0.0912	27.5287	0.0556	31.4482	0.8763	30.4297	0.0392	29.5977	0.3363	29.0536	0.1121

IV. TARTIŞMA

Şekil 12 incelendiğinde GA ve CS algoritmasının SA'ya göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. GA ve CS'nin, Harita 1 ve Harita 2'de planladığı yollar yakınken Harita 3'te GA daha iyi sonuç vermiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere SA'nın diğer algoritmalara oranla planladığı yolun uzunluğu fazla olmasına rağmen çalışması süresi açısından diğer algoritmalara göre daha avantajlıdır. Birbirlerine hemen hemen yakın sonuç veren GA ve CS'yi inceleyecek olursak GA süre bakımından daha iyi bir sonuç verirken, CS'nin standart sapma değerinin daha iyi olduğu görülmektir.

Haritalar literatürdeki bir çalışmadan alınmış ve bu çalışmada olduğu gibi algoritmalar 50 iterasyon değerinde ve 30 kez çalıştırılmıştır [14]. Literatürdeki çalışmada matematik tabanlı metasezgisel algoritmalar olan Stokastik Fraktal Algoritması (SFS), Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA), Sinüs Kosinüs Algoritması (SCA) kullanılmıştır. Yapılan çalışma ile sonuçları karşılaştıracak olursak, GA ve CS algoritmaları AOA ve SCA'dan daha iyi sonuçlar vermiştir. SA Harita 1'de AOA ve SCA'ya yakın, Harita 2'de daha kötü, Harita 3'te ise bu algoritmalardan daha iyi sonuç vermiştir. GA ve CS Harita 1 ve Harita 2'de SFS'ye yakın bir sonuç verirken, Harita 3'te SFS'den daha iyi sonuç vermiştir. SFS, Harita 1 ve Harita 3'te standart sapma olarak GA ve CS'den daha iyi sonuçlar vermiştir. Süre açısından baktığımızda ise SA, GA ve CS'nin bu algoritmalara büyük bir üstünlük kurduğunu söyleyebiliriz.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada üç farklı zorlukta engeller içeren harita tasarımları kullanılarak SA, GA ve CS metasezgisellerinin yol planlama performansları incelenmiştir. GA ve CS yolun maliyeti açısından SA'dan daha iyi bir sonuç vermiştir. SA algoritması ise GA ve CS'den daha hızlı çalışmaktadır. Daha sonra bu algoritmalar literatürdeki matematik tabanlı metasezgisellerin incelendiği çalışma ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, GA ve CS'nin AOA ve SCA algoritmalarından daha iyi, SFS algoritmasına da yakın bir sonuç verdiği görülmüştür. SA, GA ve CS algoritmaları bu matematiksel tabanlı algoritmalarından daha hızlı çalışmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] M. Eyüboğlu ve G. ATALI, "Çok Yönlü İşbirlikçi Mobil Robotlar için Eş Zamanlı Hareket Planlama Algoritmasının Geliştirilmesi ve Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, Nisan 2022.

[2] Z. Zexuan, W. Fangxiao, H. Shan, S. Yiwen, "Global Path Planning of Mobile Robots Using a Memetic Algorithm", *International Journal of Systems Science*, 46(11):1982–1993, 2015.

[3] Z. Garip, "Mobil Robotların Yol Planlaması için Meta-Sezgisel Hibrit Algoritmalar Geliştirilmesi ve Uygulanması", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, Ağustos 2018.

[4] H. Zhang, W. Lin, ve A. Chen, "Path Planning for the Mobile Robot: A Review", *Symmetry*, c10(10), 450, 2018, doi: 10.3390/sym10100450.

[5] M.A. Contreras-Cruz, V. Ayala-Ramirez, U.H. Hernandez-Belmonte, "Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming", *Appl. Soft Comput.*, 30, 319–328, 2015.

[6] H.V. Hoang, H.A. Sang, C.C. Tae, "Dyna-Q-based vector direction for path planning problem of autonomous mobile robots in unknown environments", *Adv. Robot*, 27, 159–173, 2013.

[7] Y. Xu, Q. Li, X. Xu, J. Yang, ve Y. Chen, "Research Progress of Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms in Mobile Robot Path Planning", *Electronics*, c. 12, sy 15, s. 3263, Tem. 2023, doi: 10.3390/electronics12153263.

[8] F. Gul, W. Rahiman, S. S. N. Alhady, A. Ali, I. Mir, ve A. Jalil, "Meta-heuristic approach for solving multi-objective path planning for autonomous guided robot using PSO–GWO optimization algorithm with evolutionary programming", *J Ambient Intell Human Comput*, c. 12, sy 7, ss. 7873-7890, Tem. 2021, doi: 10.1007/s12652-020-02514-w.

[9] P. K. Mohanty ve D. R. Parhi, "Optimal path planning for a mobile robot using cuckoo search algorithm", Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, c. 28, sy 1-2, ss. 35-52, Mar. 2016, doi: 10.1080/0952813X.2014.971442.

[10] Yee Zi Cong ve S. G. Ponnambalam, "Mobile robot path planning using ant colony optimization", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore: IEEE, Tem. 2009, ss. 851-856. doi: 10.1109/AIM.2009.5229903.

[11] L. B. Amar ve W. M. Jasim, "Hybrid metaheuristic approach for robot path planning in dynamic environment", *Bulletin EEI*, c. 10, sy 4, ss. 2152-2162, Ağu. 2021, doi: 10.11591/eei.v10i4.2836.

[12] S. Lin, A. Liu, J. Wang, ve X. Kong, "An intelligence-based hybrid PSO-SA for mobile robot path planning in warehouse", *Journal of Computational Science*, c. 67, s. 101938, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jocs.2022.101938.

[13] A. Tuncer ve M. Yildirim, "Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm", *Computers & Electrical Engineering*, c. 38, sy 6, ss. 1564-1572, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.compeleceng.2012.06.016.

[14] M. Y. Yildirim ve R. Akay, "Izgara Bazlı Yol Planlama için Matematik Tabanlı Metasezgisellerin Karşılaştırılması", *European Journal of Science and Technology*, Ocak 2022, doi: 10.31590/ejosat.1039899.

[15] D. Karaboğa, "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 7. Basım, Kasım 2020.

[16] G. Velleda Gonzales, E. Domingues Dos Santos, L. Ramos Emmendorfer, L. André Isoldi, L. A. Oliveira Rocha, ve E. Da Silva Diaz Estrada, "A Comparative Study of Simulated Annealing with different Cooling Schedules for Geometric Optimization of a Heat Transfer Problem According to Constructal Design", *Scientia Plena*, c. 11, sy 8, Ağu. 2015, doi: 10.14808/sci.plena.2015.081321.

[17] G. Bektaş, S. M. Nigdeli, M. Yücel ve E. Kayabekir, "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları ve Mühendislik Uygulamaları", Seçkin Yayıncılık, Ankara, Mart 2021.

[18] Guguk Kuşu (Cuckoo) Arama/Optimizasyon Algoritması. Available from: https://medium.com/@seckindikbayir/guguk-ku%C5%9Fu-arama-optimizasyon-algoritmas%C4%B1-94049efea5b2 [erişim 4 Mart, 2024]

[19] X.-S. Yang ve Suash Deb, "Cuckoo Search via Lévy flights", *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, Coimbatore, India: IEEE, 2009, ss. 210-214. doi: 10.1109/NABIC.2009.5393690.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Prefabrik Bir Sanayi Yapısının Deprem Etkisindeki Performansı ve İyileştirme Önerileri

Eyüp Emre Öztürk[a], Güray Arslan[b]*

[a]Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b]Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** eyup.ozturk@std.yildiz.edu.tr

ÖZET

Türkiye'deki sanayi üretiminin büyük bir bölümü, deprem tehlikesinin yoğun olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Son yıllarda sanayileşmenin artışı ile sanayi yapılarının yapım sürecinde önüretimli (prefabrik) betonarme yapı elemanları yaygın olarak kullanılmaktadır. Prefabrik yapıların yaygın kullanımındaki artış ile deprem etkisine maruz kalmasında da artış görülmektedir. 6 Şubat 2023 tarihli depremlerden etkilenen bölgede bulunan betonarme prefabrik yapıların büyük çoğunluğu tek katlı, çok açıklıklı ve çatı kotunda pim bağlantılıdır. Kolonlar, ankastre olan alt kotlarında yerinde dökme betonarme soket tekil temellere oturtulmaktadır. Kolon üst ucunda bulunan kısa konsoldan çıkan pimlere, dolu gövdeli eğik çatı kirişleri veya kirişler oturtulmakta ve kirişte bırakılan silindirik pim boşluğunun etrafı harç ile doldurulmaktadır. Bu çalışmada, deprem bölgesindeki prefabrik yapıyı temsil edebilecek boyutlarda önüretimli betonarme bir endüstri yapısı Ls-Dyna sonlu elemanlar programında modellenmiş, Kahramanmaraş deprem kayıtları altında analiz edilmiştir. Göçme moduna geçen yapıda göçme mekanizması incelenmiş ve oluşan iç kuvvetler belirlenmiştir. Çelik plakalar ve ankrajlar vasıtasıyla, yük aktarma mekanizmasına göre güçlendirilen aşık-makas ve kolon-makas tipik bağlantıları için lokal olarak Ls-Dyna programında iki farklı katı model oluşturulmuştur. Deprem ivme kayıtlarından elde edilen iç kuvvetler Ls-Dyna modellerine etkitilerek analizler tamamlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda çelik güçlendirme elemanlarında belirli seviyelerde deformasyonların oluştuğu, buna karşın yapısal elemanlarda herhangi bir kapasite kaybı yaşanmadan deprem etkilerinin sönümlenebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Güçlendirme, Ls-Dyna, Prefabrik*

Performance of a Prefabricated Industrial Building Under Earthquake Effects and Suggestions for Improvement

ABSTRACT

A large part of the industrial production in Turkey is located in earthquake intense regions. On February 6, 2023, the majority of the prefabricated structures in the region affected by the earthquakes were single storey, multi-span and pin connected at the roof level. Columns are placed in single foundation sockets at their lower ends. Roof beams and trusses are placed on the cantilevers at the upper end of the column through the gap left in the beam and the gap is filled with mortar. In this study, a prefabricated reinforced concrete industrial structure is modeled in Ls-Dyna finite element program and analyzed under Kahramanmaraş earthquake records. The collapse mechanism of the collapsed structure was investigated and the internal forces were determined. Two different solid models were created locally in Ls-Dyna for the typical connections of purlin-truss and column-truss connections, which were retrofitted according to the load transfer mechanism with steel plates and anchors. The internal forces were applied to Ls-Dyna models and the analyses were completed. As a result, it was observed that certain levels of deformations occurred in the steel retrofit elements, but the earthquake effects could be damped without any capacity loss in the structural elements.

Keywords: *Retrofit, Ls-Dyna, Prefabricated*

I. GİRİŞ

Prefabrik yapım tekniği, bir yapıya ait taşıyıcı elemanların fabrika ortamında hazır kalıplar vasıtasıyla üretilerek inşaat sahasına nakledilmesini ve bu yapısal elemanların saha ortamında birleştirilerek yapının inşasının tamamlanmasını ifade eder [1]. Bu yapım tekniği, hazır kalıplar içerisinde aynı anda ve çok sayıda yapısal elemanın hızlı bir şekilde üretilebilmesi ve fabrika ortamındaki kapalı ortam koşullarının sağladığı yüksek üretim kalitesi avantajları sebebiyle dünya üzerinde pek çok yerde kullanılmaktadır. Benzer şekilde ülkemizde de yaygın olarak kullanılmakla birlikte mevcut prefabrik yapı stoğu incelendiğinde çoğunluğu tek katlı ve çok açıklıklı endüstriyel yapıların oluşturduğu görülmektedir. Sıklıkla rastlanan bu tip yapılarda yapısal elemanlar arasındaki birleşim noktaları özelinde de yüksek oranda benzerlikler bulunmaktadır. Bu benzerlikler prefabrik betonarme kolonlarla çatı düzlemindeki eğik çatı kirişleri arasındaki bağlantıların ve yine eğik çatı kirişleriyle çatı aşıkları arasındaki bağlantıların mafsallı pimli bağlantılar olmasıdır [2]. Ülkemizde yaşanan Kahramanmaraş depremleri sonucu bu tip tek katlı, çok açıklıklı ve çatı düzleminde birleşim noktaları mafsallı prefabrik endüstriyel yapıların önemli bir kısmının bağlantı noktalarında oluşan hasarlar sebebiyle ağır hasarlı duruma geldiği veya göçme moduna geçtiği görülmüştür [3].

Bu çalışma kapsamında deprem bölgesindeki prefabrik bir sanayi yapısını temsil edebilecek boyutlardaki bir yapı Kahramanmaraş deprem kayıtları altında analiz edilmiş, yapıdaki göçme modu belirlenerek yapı performansında yapılabilecek iyileştirmeler ve güçlendirme yöntemleri irdelenmiştir. Tasarlanan güçlendirme yöntemine bağlı olarak birleşim noktaları lokal analiz modellerinde kuvvet aktarma mekanizmalarına göre güçlendirilerek analizler tekrarlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

Yapının hesap modellerinde beton sınıfı C30, donatı çeliği sınıfı S420 ve yapısal çelik malzeme sınıfı S355 JR alınmıştır. Yapının modellenmesi için Ls-Dyna [4] sonlu elemanlar programı kullanılmış, yapılan analizlerde TBDY-2018 [7]'de tanımlanan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi uygulanmıştır. Analizlerde kullanılacak deprem kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, AFAD [5] ve Pasifik Deprem Araştırma Merkezi, PEER [6] web sayfalarından elde edilmiştir.

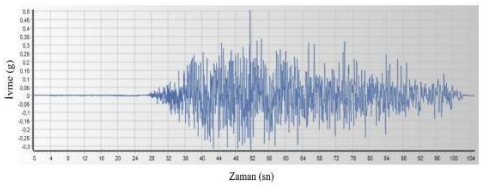
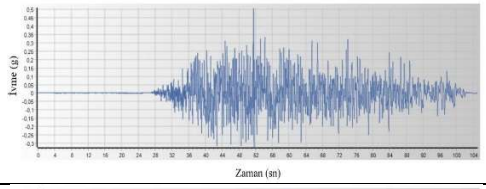
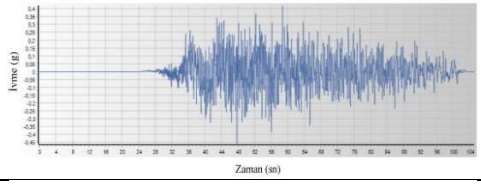
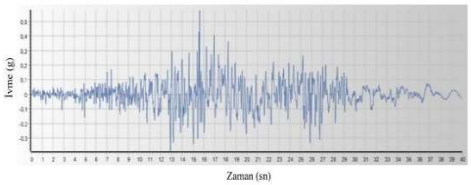
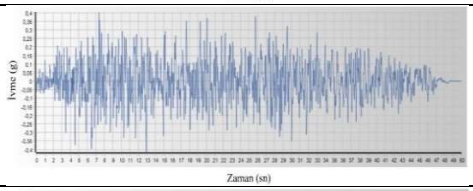
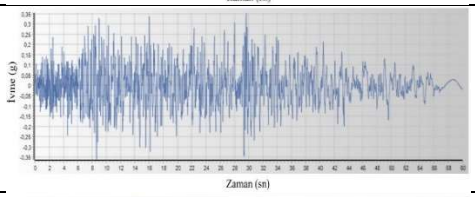
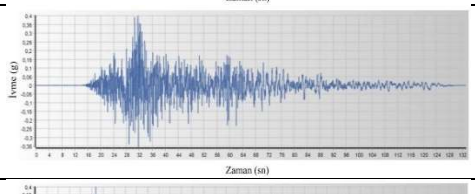
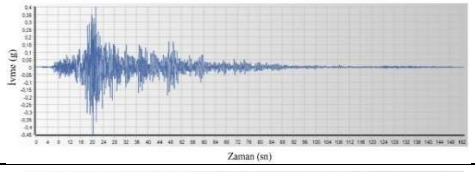
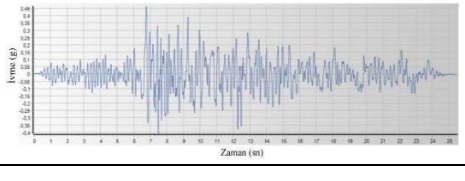
A. Deprem Kayıtları

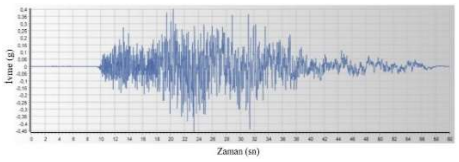
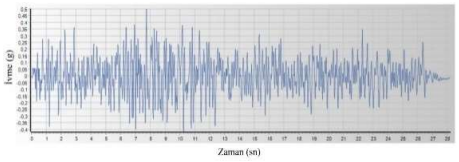
Yapının mevcut ve güçlendirilmiş haline ait analizlerde gerçek zamanlı deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır [7]. Bu kapsamda Kahramanmaraş depremleri de dâhil olmak üzere 11 adet deprem kaydı seçilmiş ve bu kayıtlar TBDY-2018'de tanımlanan kurallar takip edilerek elastik tasarım ivme spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarına ait bilgiler Tablo 1 ve Tablo 2'de, ölçeklendirme işleminde kullanılması gereken yatay elastik tasarım ivme spektrumu Şekil 1'de ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarına ait bilgiler Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.

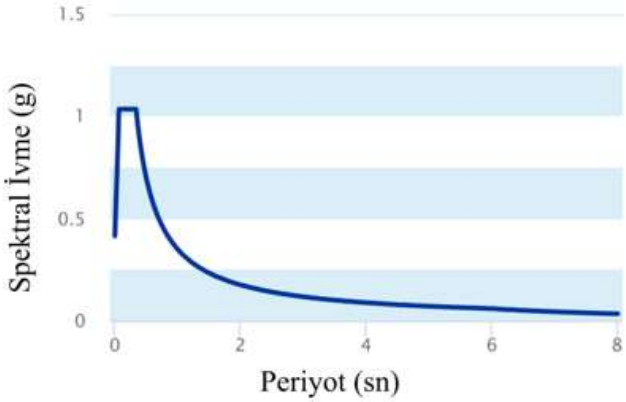
Tablo 1. Seçilen depremler

Deprem	**Yıl**	**İstasyon**	**Büyüklük**	**R_{jb} (km)**	**R_{rup} (km)**	**V_{s30} (m/sn)**
Kahramanmaraş	2023	4612	7.6	35.42	35.42	246
Kahramanmaraş	2023	4624	7.6	38.68	38.68	280
Kahramanmaraş	2023	4625	7.6	40.25	40.25	346
Landers	1992	838	7.2	34.86	34.86	370
Landers	1992	850	7.2	21.78	21.78	359
Landers	1992	862	7.2	54.25	54.25	339
Kocaeli	1999	1149	7.5	56.49	58.28	310
Kocaeli	1999	1160	7.5	53.34	55.48	386
Kocaeli	1999	1162	7.5	31.74	31.74	347
Düzce	1999	1620	7.1	45.16	45.16	411
Çaldıran	1976	1627	7.2	50.78	50.82	432

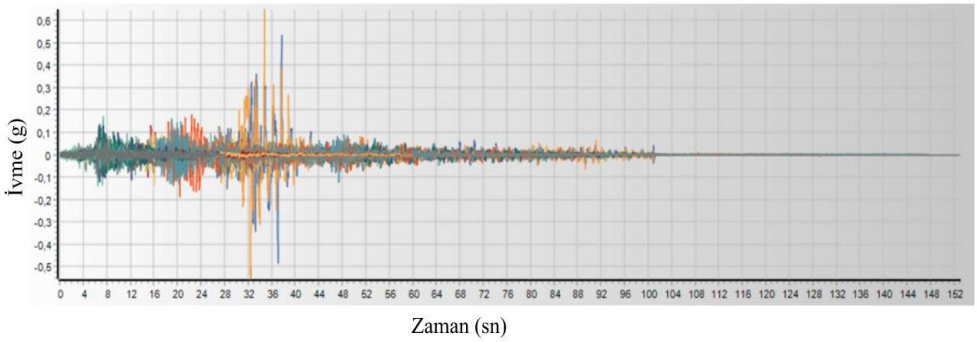
Tablo 2. İvme kayıtları

İstasyon Numarası	İvme Kaydı
4612	
4624	
4625	
838	
850	
862	
1149	
1160	
1162	

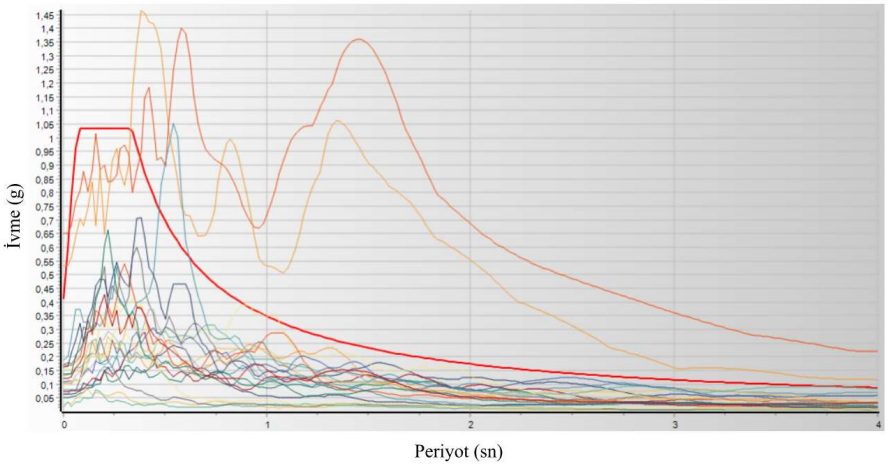
1620	
1627	



Şekil 1. Yatay elastik tasarım spektrumu



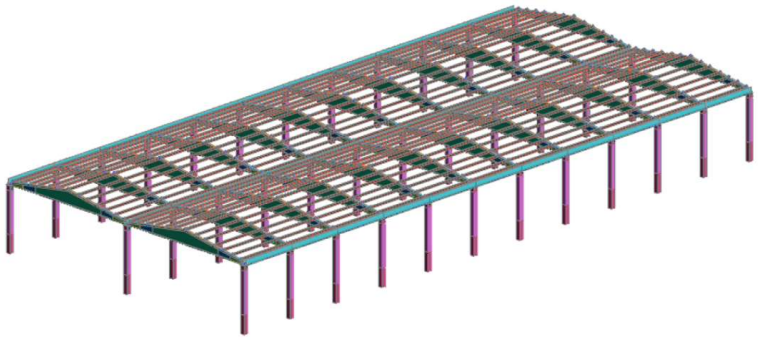
Şekil 2. Ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları



Şekil 3. Ölçeklendirilmiş deprem ivme spektrumlarıyla tasarım ivme spektrumunun karşılaştırılması

B. Mevcut Yapı Modeli ve İç Kuvvetler

Yapının mevcut hali yapısal eleman boyutları ve donatılarıyla birlikte Ls-Dyna sonlu elemanlar programına tanımlanarak modellenmiştir. Modellenen yapı, içerisinde 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş depremlerine ait deprem ivme kayıtlarının da bulunduğu toplamda 11 adet deprem kaydının her iki yönüyle birlikte analiz edilerek yapısal elemanlara ait iç kuvvetler belirlenmiştir. Yapının 3 boyutlu Ls-Dyna modeline ait görsel Şekil 4 'te verilmiştir.



Şekil 4. Yapıya ait 3 boyutlu Ls-Dyna Modeli

Çalışmanın devamında kolonlarla eğik çatı kirişleri arasındaki ve eğik çatı kirişleriyle çatı aşıkları arasındaki tipik bağlantılarda yapılan güçlendirmeler için Ls-Dyna sonlu elemanlar programında iki farklı katı model oluşturulmuş, deprem kayıtlarından elde edilen kuvvetlerin mutlak değerli maksimumlarına ait ortalamalar TBDY-2018'de verilen kurallara göre bulunarak bu katı modellere etkitilmiştir. Katı modellere ait görseller Şekil 5 ve Şekil 6'da, etkitilen kuvvetler ise Tablo 3 ve Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 3. Kolon ve eğik çatı kirişi birleşim noktasına ait iç kuvvetler

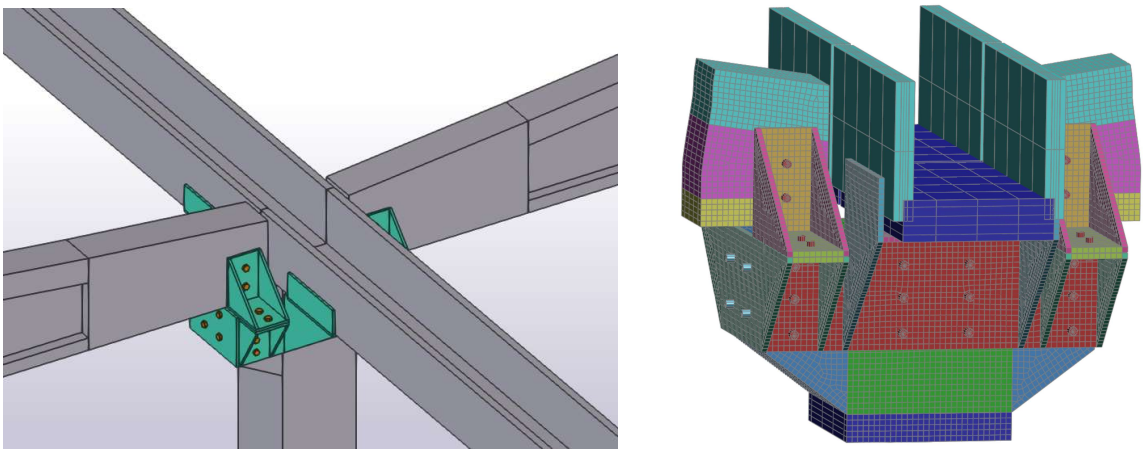
Kayıt İstasyon Numarası	**P (kN)**	**V_2 (kN)**	**V_3 (kN)**
838	101	77	105
850	136	89	124
862	127	78	141
1149	126	83	115
1160	108	71	109
1162	120	91	129
1620	114	95	115
1627	124	79	129
4612	149	109	147
4624	141	101	117
4625	143	94	141
ORTALAMALAR	126.3	88	124.7

Tablo 4. Eğik çatı kirişi ve aşık birleşim noktasına ait iç kuvvetler

Kayıt İstasyon Numarası	**P (kN)**	**V_2 (kN)**	**V_3 (kN)**
838	52	1	3
850	61	1	4
862	69	1	4
1149	57	1	4
1160	54	1	3
1162	62	1	3
1620	58	1	3
1627	63	1	3
4612	73	1	4
4624	58	1	4
4625	67	1	4
ORTALAMALAR	62	1	3.5

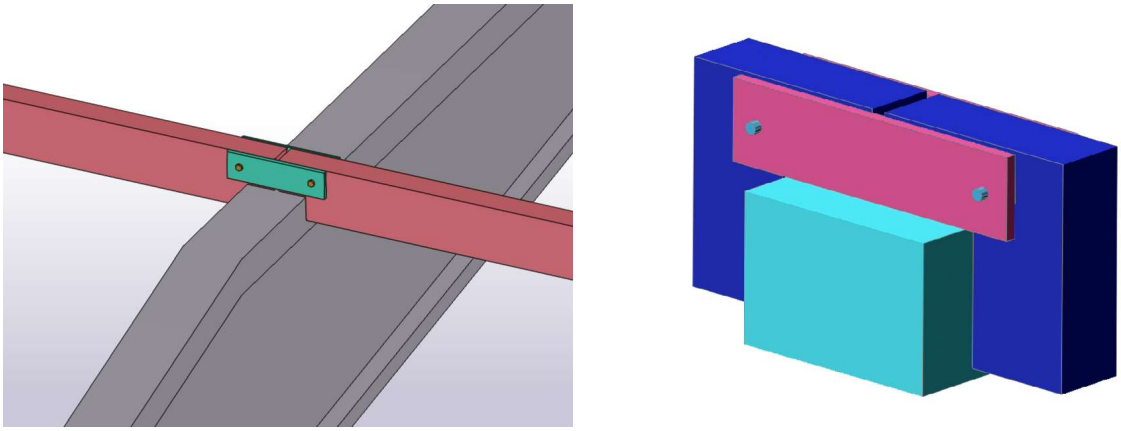
C. Güçlendirilmiş Birleşim Noktalarına Ait Katı Modeller

Eğik çatı kirişleri ve kolonlar arasındaki bağlantılar, prefabrik betonarme kolonların üst uçlarında bulunan konsollardan çıkan 2 adet Ø22 çapındaki pimlere eğik çatı kirişlerinin içerisindeki boşluklar vasıtasıyla oturtulmasıyla ve bu boşlukların yüksek dayanımlı harç ile doldurulmasıyla teşkil edilmiştir. Deprem etkileri altında bu bağlantıların yetersiz kaldığı görülmüş, bu birleşim noktasını güçlendirmek için Şekil 5'te gösterildiği üzere çelik plakalar ve ankrajlarla güçlendirme elemanları eklenmiş, birleşimin yük taşıma kapasitesi artırılmıştır.



Şekil 5. Kolon-eğik çatı kirişi birleşimi güçlendirmesi ve Ls-Dyna katı modeli

Çatı aşıklarının eğik çatı kirişleriyle olan bağlantısı da eğik çatı kirişler üzerinde bırakılmış 1 adet Ø16 çapındaki pimlerin, aşıkların her iki ucundaki boşluklardan bu pimlere oturtularak ve boşlukların harç ile doldurulmasıyla teşkil edilmektedir. Bu bağlantılar için de çelik plakalar ve ankrajlar vasıtasıyla güçlendirme işlemi yapılmıştır. Oluşturulan lokal güçlendirme modeline ait görsel ve Ls-Dyna katı modeli Şekil 6'da verilmiştir.

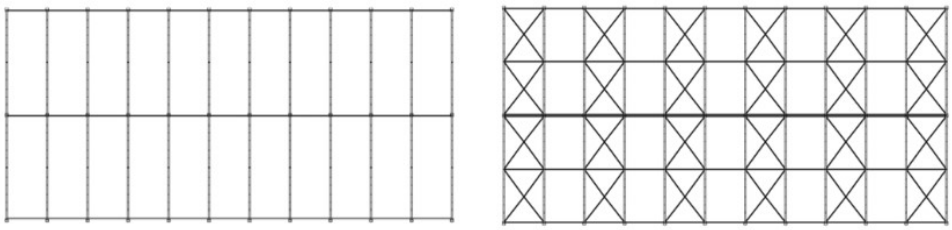


Şekil 6. Eğik çatı kirişi-aşık birleşimi güçlendirmesi ve Ls-Dyna katı modeli

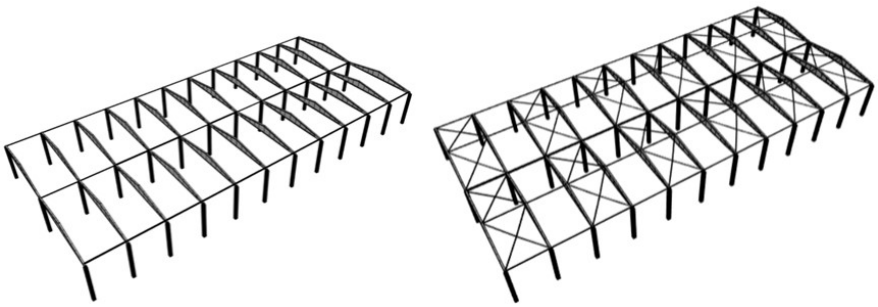
D. Çatı Düzlemi Diyafram Sistemi

Çatı düzlemindeki rijit diyafram davranışını sağlamakta çatı kaplamalarının yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu diyafram davranışını çatı düzleminde sağlayarak eğik çatı kirişlerinin birbirlerinden farklı yatay deplasmanlarını engellemek ve deprem kuvvetlerinin aşıkların ve çatı kaplamalarının bağlantıları üzerinde toplanmasının önüne geçmek için eğik çatı kirişleri arasında çelik çapraz profiller ve

basınç çubukları sisteme eklenmiştir. Mevcut ve güçlendirilmiş çatı düzlemi taşıyıcı sistemine ait görseller Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.



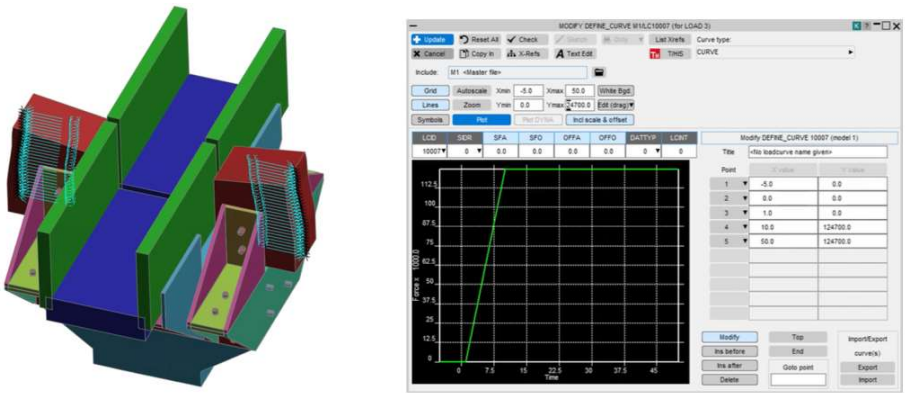
Şekil 7. Mevcut ve güçlendirilmiş çatı düzlemi plan görünümü



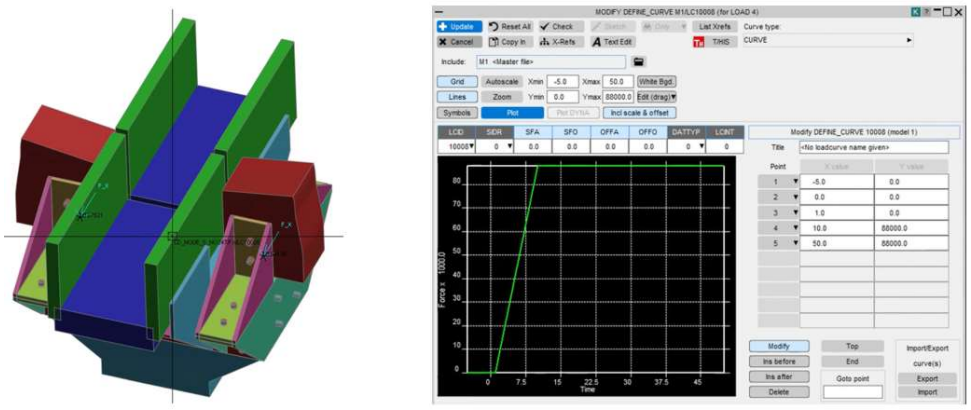
Şekil 8. Mevcut ve güçlendirilmiş çatı düzlemi 3 boyutlu görünümü

E. İç Kuvvetlerin Modele Etkitilmesi

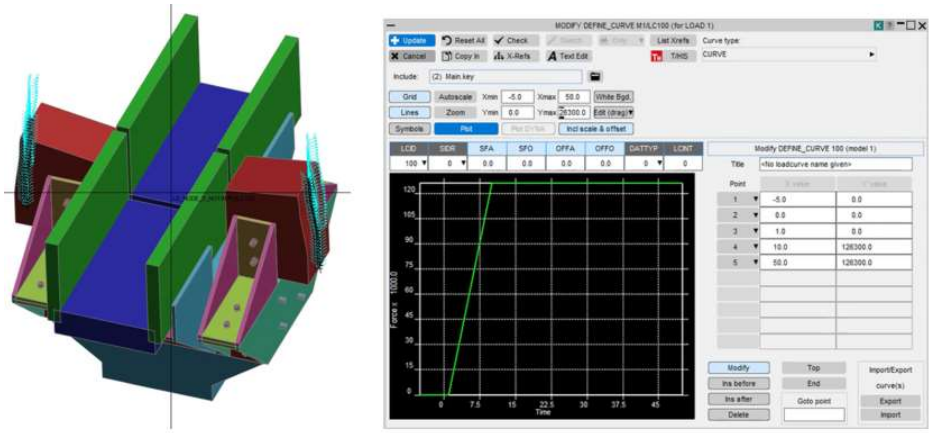
Tablo 3 ve Tablo 4'te verilen iç kuvvetler, sırasıyla kolon ve eğik çatı kirişi birleşimi için oluşturulan katı modellere P, V2 ve V3 eksenel ve kesme kuvvetleri, kuvvet doğrultularına uygun şekillerde etkitilmiştir. Modellere etkitilen iç kuvvetler ani bir yükleme olarak tanımlanmamış, zamana bağlı olarak artan ve maksimum değerine 10. saniye sonunda ulaşacak şekilde tanımlanmıştır.



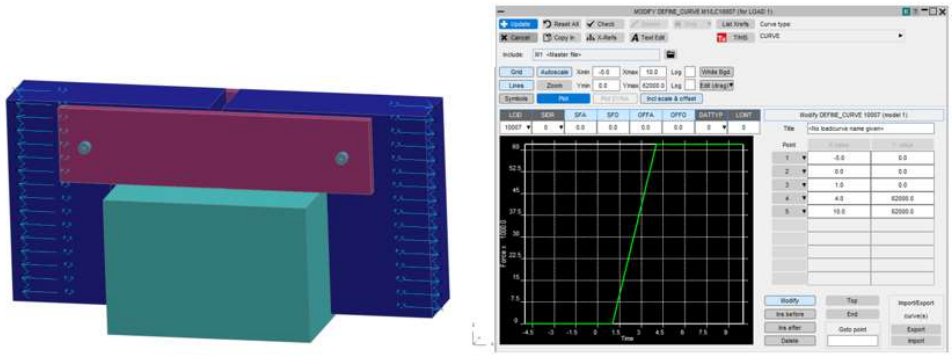
Şekil 9. Kolon-eğik çatı kirişi V3 yönü kesme kuvveti ve kuvvet diyagramı



Şekil 10. Kolon-eğik çatı kirişi V2 yönü kesme kuvveti ve kuvvet diyagramı



Şekil 11. Kolon-eğik çatı kirişi P eksenel kuvveti ve kuvvet diyagramı



Şekil 12. Eğik çatı kirişi-aşık kesme kuvveti ve kuvvet diyagramı

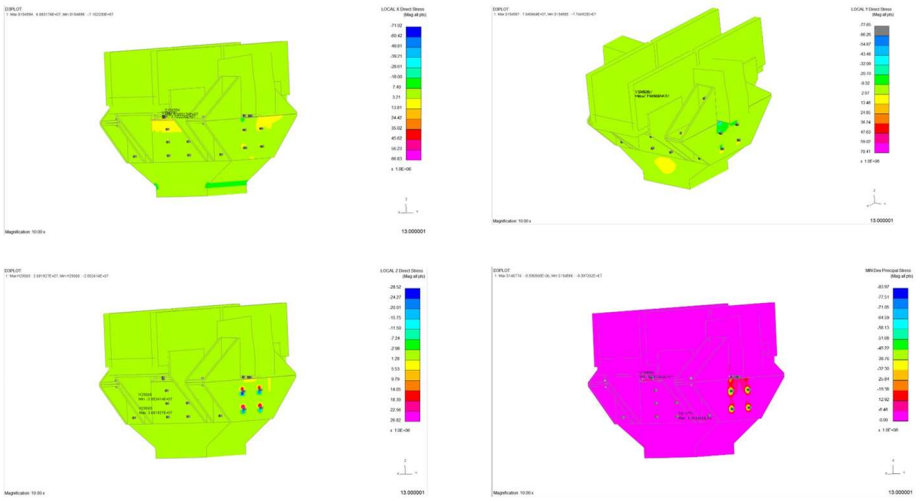
III. SONUÇLAR

Yapı, mevcut haliyle Kahramanmaraş deprem kayıtları altında analiz edilmiş ve yapının göçme moduna geçtiği görülmüştür. Yapının göçme modu incelendiğinde temel sebebin çatı düzlemindeki rijit diyafram eksikliği olduğu ve bu eksikliğin zincirleme bir göçme reaksiyonunu başlattığı anlaşılmıştır. Çatı düzleminde rijit diyafram etkisini sağlamakta yetersiz kalan çatı kaplamaları sistemden ayrılmış, çatı düzlemindeki tüm yanal yük çatı aşıkları üzerinden aktarılmaya başlanmıştır. Yatay yük taşımak üzere

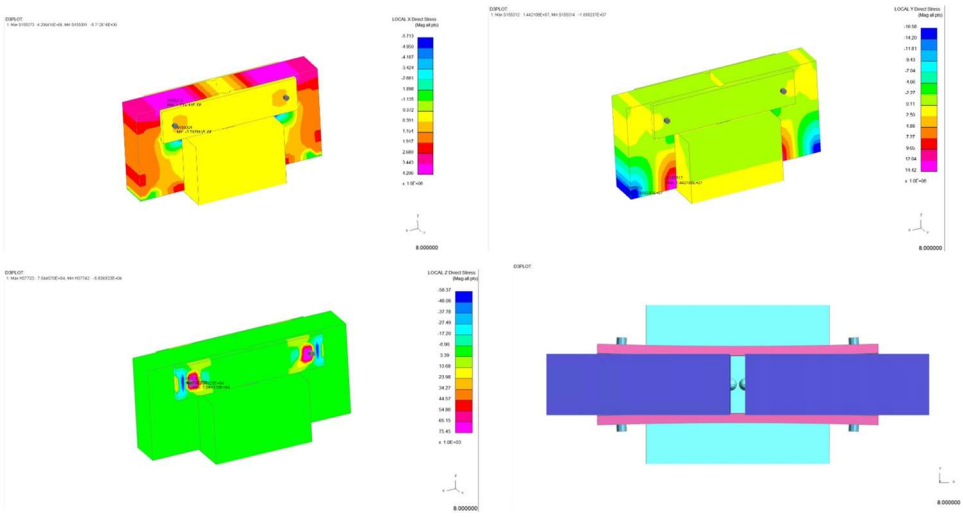
tasarlanmayan tek pim bağlantılı çatı aşıkları da deprem kuvvetleri altında eğik çatı kirişleri üzerindeki bağlantılarından koparak çatı düzleminden düşmüştür. Sonuç olarak yanal düzlemde tamamen serbest kalan eğik çatı kirişleri devrilme eğilimine geçmiş, kolon üst ucundaki konsollarda bulunan pim bağlantıları üzerinde ilave kesme kuvvetlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuş ve benzer şekilde eğik çatı kirişleri de bağlantılarını koparak çatı düzleminden düşerek göçmüştür.

Tüm bu mekanizma incelendiğinde, mevcut yapının güçlendirilmesinde öncelikle çatı düzleminde rijit diyafram etkisi oluşturma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda eğik çatı kirişleri arasına çelik çapraz profilleri ve basınç çubukları eklenmiş, eğik çatı kirişleri ve aşıklar arasında çelik takviye plakaları ve ankrajlar kullanılarak aşıkların tek pimli bağlantılarında kapasite artışı sağlanmış son olarak da eğik çatı kirişlerinin kolonlarla olan bağlantılarında çelik takviye plakaları ve ankrajlar kullanılarak birleşimin taşıma kapasitesi artırılmıştır. Bu güçlendirme plaka ve ankrajları, mafsallı olan birleşim noktalarında kuvvet çifti oluşturmadan ek moment yükleri yaratmayacak şekilde tasarlanmış, yapı davranış prensibi değiştirilmeden birleşimlerin güçlendirilmesi hedeflenmiştir.

Sonrasında 11 adet deprem kaydı ile sistemde oluşan iç kuvvetler belirlenmiş ve oluşturulan güçlendirilmiş lokal katı modellere bu kuvvetler etkitilerek analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara ait gerilme diyagramları Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmiştir. Deprem kuvvetleri, çelik güçlendirme elemanları üzerinde oluşan deformasyonlarla sönümlenmiş, herhangi bir yapısal elamanda veya birleşim elemanında kapasite yetersizliği ortaya çıkmamıştır.



Şekil 13. Kolon-eğik çatı kirişi güçlendirilmiş birleşimi analiz sonuçları



Şekil 14. Eğik çatı kirişi-aşık güçlendirilmiş birleşimi analiz sonuçları

IV. TARTIŞMA

Yapılan bu çalışma içerisinde de incelenen, ülkemizdeki prefabrik endüstriyel yapı stoğunun önemli bir kısmını oluşturan çatı düzlemindeki bağlantıları mafsallı tek katlı ve çok açıklıklı bir prefabrik yapı güçlendirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli husus yatay yük aktarım mekanizması ve buna bağlı olarak birleşim noktalarının yeterliliğidir. Güncel deprem yönetmeliğimizde prefabrik yapılarda rijit diyafram davranışıyla alakalı birtakım şartlar bulunmakta fakat önceki yönetmeliklerde böyle tarif bulunmamaktadır [8]. Bu sebepten yapım yılına da bağlı olarak prefabrik yapılarda ağır hasar veya göçmelerin engellenmesi için bu husus güçlendirme işlemleri açısından birincil öncelik olmalıdır. Tespit edilen zafiyetler için yapılacak güçlendirmelerde çalışma kapsamında incelenen çelik plaka ve ankrajlarla güçlendirme yöntemi bir alternatif olabilecektir.

V. ÇIKARIM

Güçlendirme ihtiyacı bulunan prefabrik yapılar çatı düzleminde çelik profillerle sağlanan rijit diyafram etkisi ve çelik plaka ve ankrajlı birleşim noktaları güçlendirmeleriyle deprem etkilerini ağır hasar almadan sönümleyebilecektir. Çalışma kapsamında tariflenen güçlendirme işlemleriyle, deprem etkileri sonucu ortaya çıkan can ve mal kayıplarından kaçınılabilir.

KAYNAKLAR

[1] İ. Doğruöz. "Prefabrike Endüstri Yapılarının Tasarımı Onarım-Güçlendirmesi ve Maliyet Karşılaştırması, İstanbul, 2005.
[2] H. Kaplan S.Yılmaz N.Çetinkaya H.Nohutçu E.Atımtay H.Gönen. "Prefabrik Endüstri Yapılarının Güçlendirilmesi İçin Yeni Bir Yöntem", Ankara, 2009.
[3] D.Bekiroğlu. "Prefabrike Yapıların Depreme Dayanıklı Tasarımı, Onarım ve Güçlendirilmesi", İstanbul, 2006.
[4] Ls-Dyna: Livermore Software Technology Corporation, California, USA, 2006.
[5] AFAD. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, https://tadas.afad.gov.tr.
[6] Pasifik Deprem Araştırma Merkezi. PEER, https://ngawest2.berkeley.edu.
[7] TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
[8] N. Geydirici. "Sanayi Tipi Prefabrike Yapılarda Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Güçlendirme", İstanbul, 2001.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Parkinson Hastalığı El Titremesi Analizi

Ferdi Akıncı[a], Fatih Kayaalp[a], Enver Küçükkülahlı[a]*
[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** ferdi95830@ogr.duzce.edu.tr

ÖZET

Parkinson Hastalığı (PH), motor ve non-motor belirtilerle ortaya çıkan ve yaygın olarak görülmekte olan nörodejeneratif bir hastalıktır. Bu çalışmada, hastanın çizmesi istenilen şekillerdeki bozuklukların değerlendirilmesiyle Parkinson hastalarındaki el titreme analizi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışma kapsamında hastaların ve doktorların kullanımına uygun bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımda, hastanın el titremesini takip edebilmek için şekiller gösterilmekte ve hastanın bu çizimleri yapması istenilmektedir. Çizim yapılacak şekiller, 3 farklı zorluk seviyesinde toplamda 8 farklı geometrik şekilden oluşmaktadır. Yazılıma hasta kendi bilgileriyle giriş yaptığında ilgili şekli seçip çizim işlemini gerçekleştirdikten sonra "Çizimi Kaydet" butonuna tıklayarak çizim değerleri ve çizim ekran görüntüsü bulut ortamında bulunan veri tabanına kaydedilir. Doktorlar da kendi bilgileriyle sisteme giriş yaptıklarında kendisine ait kayıtlı hastaların kişisel bilgilerini, çizim bilgilerini, çizmesi istenilen şekil ile hastanın çizdiği şekil karşılaştırıldığında ortaya çıkan doğru çizim oranlarını ve yaptığı çizimin ekran görüntüsünü görebilmektedir. Hastanın geçmiş kayıtlarını kendi içinde karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmektedir. Sunulan bu çalışma dahilinde hem hastanın el titremesi rahatsızlığının ilerleme ya da gerilemesi takip edilebilmekte hem de dijital ortamda hastalarla ilgili bir veri toplama altyapısı kurulmaktadır. İlerleyen çalışmalarda, bu verilerin çeşitli yapay zeka yöntemleriyle analizi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Parkinson Hastalığı, Parkinson El Titreme Analizi, Parkinson İzleme, Parkinson İzleme Yazılımı*

Parkinson's Disease Hand Tremor Analysis

Ferdi Akıncı[a], Fatih Kayaalp[a], Enver Küçükkülahlı[a]*
[a]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
[*]**Corresponding Author:** ferdi95830@ogr.duzce.edu.tr

ABSTRACT

Parkinson's Disease (PD) is a common neurodegenerative disease that presents with motor and non-motor symptoms. In this study, it was aimed to analyze hand tremors in Parkinson's patients by evaluating the disorders in the shapes that the patient was asked to draw. Within the scope of the study, a software to be used by patients and doctors was developed. In the software, figures to monitor the patient's hand tremors are shown and the patient is asked to make these drawings. The shapes to be drawn consist of a total of 8 different geometric shapes in 3 different difficulty levels. After logging on to the system, the patient selects the relevant shape and performs the drawing. When "Save Drawing" button is clicked, the drawing values and drawing screenshot are saved to the database in the cloud. When doctors log in to the system, they can see the personal information of their registered patients, their drawing information, the correct drawing ratios of the shape that patients are asked to draw, and the screenshot of the drawing they made. Patients past records or drawings can be evaluated comparatively. Within the scope of this study, the progress or regression of the patient's hand tremor disorder can be monitored and a data collection infrastructure about the patients is established in the digital environment. In future studies, it is aimed to analyze this data with artificial intelligence methods.

Keywords: *Parkinson's Disease, Parkinson's Hand Tremor Analysis, Parkinson's Monitoring, Parkinson's Monitoring Software*

I. GİRİŞ

Parkinson Hastalığı (PH), motor ve non-motor belirtilerle ortaya çıkan ve yaygın olarak görülmekte olan nörodejeneratif bir hastalıktır [1]. İlk kez 1817 yılında Dr. James Parkinson tarafından tanımlanmıştır [2]. Hastalık progressif özelliği, kardinal titreme ve nörolojik belirtiler ile ortaya çıkmaktadır ve hastaların günlük yaşamını etkilemektedir. Bu bireylere bakmakla yükümlü hasta yakınları için de bu süreç önemli hale gelmektedir [3]. Hastalığın temel sebeplerinden biri yaşın ilerlemesiyle birlikte beyinde dopamin salgılayan hücrelerin azalmasından kaynaklıdır. Genel nüfusun %0,3'ü ve 65 yaş üstü nüfusun %1-3'ü ve 2030 yılına kadar bu sayının 8,7 milyondan 9,3 milyona yükseleceği tahmin edilmektedir [4],[5].

Parkinson hastalığının günümüzde kesin bir tedavisi olmadığı, uygulanan tedavi yöntemlerinin ise hastalık belirtilerinin azalması ve hastaların günlük yaşamının iyileştirilmesi üzerine olduğu görülmektedir. Parkinson hastalığı motor semptomlarda genellikle tek taraflı titreme ile görülmektedir ve titremeler hastalığın başlangıcında genellikle kol ve bacaklarda görülürken bazı hastalarda ise sadece başparmakta ya da herhangi bir parmakta görülmektedir. Parmaklarda görülen tremor (4-6 Hz), esansiyel tremor olarak bilinen kollarda ve bacaklarda görülen tremorlardan (8-10 Hz) daha yavaş olduğu ve daha çok istirahat halinde olduğu görülmektedir [6].

Parmaklardaki titremelerin takibini yapabilmek için hastaya kağıt üzerinde farklı çizimler sunulmaktadır [7]. Muayenelerde yapılan bu çizimler ile doktorlar, hastaların parmaklarındaki titremelerin sonuçlarını tespit etmektedir. Bu çalışmada el titreme analizi ve takibi için yazılım geliştirilmiştir, geliştirilen yazılım ile birlikte hastalardaki el titreme takibinin dijital ortamda yapılması sağlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

Yazılım, microsoft visual studio 2019 geliştirme ortamı üzerinde C# (CSharp) yazılım dilinde geliştirilmiştir, veri tabanı olarak MS-SQL 2019 (Microsoft Sql Server) kullanılmıştır. Veritabanı, hosting dünyam tarafından Türkiye lokasyonunda bulunan sunuculardan Intel Xeon 4 CPU E5-2699-V4 işlemci, 8 GB DDR4 Ram, 100 GB SSD disk donanımlarına ve windows server 2019 işletim sistemine sahip olan sunucu üzerine kurulumu yapılmıştır. Çizimler de buradaki sunucuda yer alan şifreli paylaşım alanında tutulmaktadır.

Yazılım başlatıldığında giriş ekranı açılmaktadır. Bu ekranda doktor ve hasta girişi olmak üzere 2 farklı giriş seçeneği bulunmaktadır. Ayrıca yeni kayıt yapacak doktor ve hastalar için kayıt ol seçeneği bulunmaktadır. Kayıt ol seçeneği ile doktorlar ve hastalar bilgi işlem personeline ihtiyaç duymadan sisteme kendileri basit bir şekilde kayıt olabilmektedir. Tüm bilgiler veri tabanında tutulmaktadır. Giriş için bilgiler girildiğinde "Giriş" butonuna tıklandığında yazılım, veri tabanındaki bilgilere göre girilen bilgilerin doğruluğunu kontrol eder. Bilgiler hatalı ise uyarı mesajı verir, bilgiler doğru ise bir sonraki ekran açılır.

Yazılım giriş ekranı Şekil 1'de gösterilmektedir.

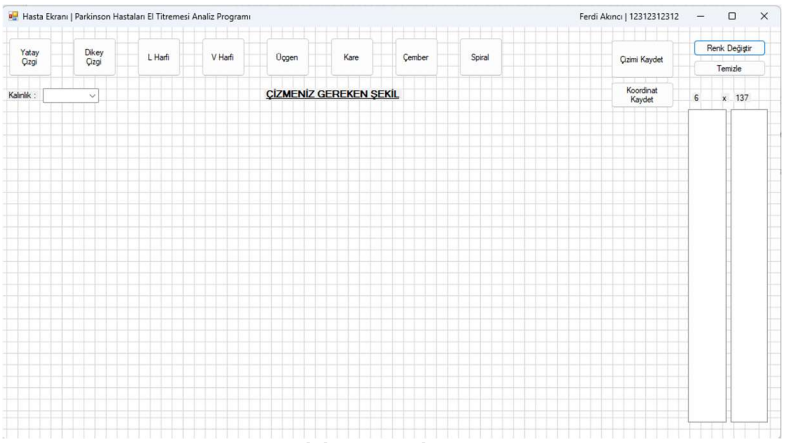


Şekil. 1 Yazılım giriş ekranı

A. Hasta Girişi

Giriş ekranında seçiniz kısmında "Hasta" seçildikten sonra hasta bilgileri ile giriş yapıldığında çizim ekranı açılmaktadır. Burada 3 farklı zorluk seviyesinde toplamda 8 farklı şekil bulunmaktadır. Bunlar yatay çizgi, dikey çizgi, L harfi, V harfi, üçgen, kare, çember ve spiraldir. Şekillerde kalın çizgi, orta çizgi ve ince çizgi olmak üzere her şeklin 3 farklı zorluk seviyesi belirlenmiştir. Hasta çizim yapmak için ilk olarak çizim yapacağı şekli seçmeli, sonrasında zorluk seviyesini seçmelidir. Seçimleri yaptıktan sonra çizmesi gereken şekil kesik çizgilerle ekranda gözükmektedir. Hastadan bu kesik çizgileri takip edip çizmesi beklenmektedir. Burada belirtilen toplamda 24 şeklin ayrı ayrı çizim koordinat bilgileri hesaplanmıştır, oluşturulan algoritma ile birlikte koordinat bilgileri program içerisinde belirtilmiştir. Çizim esnasında çizim koordinat bilgileri anlık olarak alınmaktadır, çizimler seçimi yapılan şeklin hesaplanan koordinat aralığında ise çizim yeşil renkte, koordinat dışında ise kırmızı renkte renklendirilmiştir. Bu renklendirmeler ile çizim esnasında hatalı çizimlerin görülmesi sağlanmıştır. Çizim tamamlandığında "Çizimi Kaydet" butonuna tıklandığında çizim sonuçları bulutta hazırlanan veri tabanına, çizim ekran görüntüsü ise buluttaki sunucuda hazırlanan güvenli paylaşım alanına çizim etiket bilgileriyle birlikte kaydedilmektedir.

Hasta ekranı Şekil 2'de gösterilmiştir.

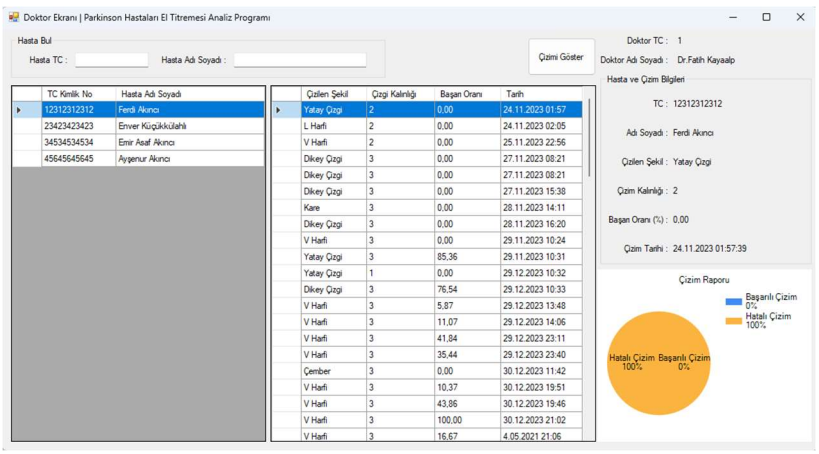


Şekil. 2 Hasta ekranı

B. Doktor Girişi

Giriş ekranında seçiniz kısmında "Doktor" seçildikten sonra doktor kendi bilgileri ile giriş yaptığında kendisine kayıtlı hastaları göreceği ekran açılmaktadır. Üst tarafta bulunan filtreler ile hasta arama yapabilmektedir. Bu ekranda doktor; hasta bilgilerini ve çizimlerini görebilmektedir. Önceki çizim sonuçları ile birlikte karşılaştırma yapabilmektedir. Karşılaştırma sonucu hastanın el titremesinde ilerleme ya da gerileme olması ile ilgili sonuçları görebilmektedir. "Çizimi Göster" butonuna tıkladığında hastanın çizim ekran görüntüsünü görebilmektedir.

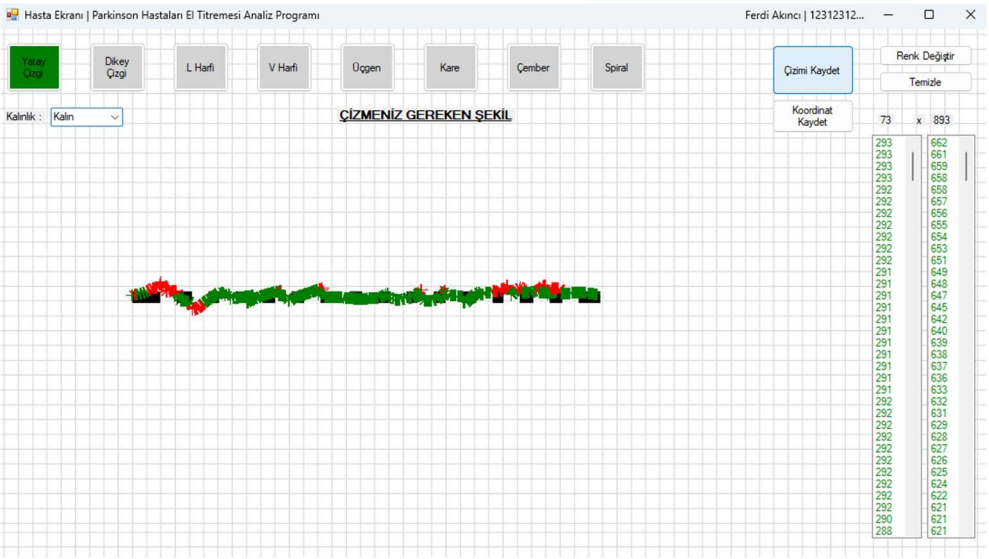
Doktorlar için hasta ve çizimleri görüntüleme ekranı Şekil 3'te gösterilmiştir.



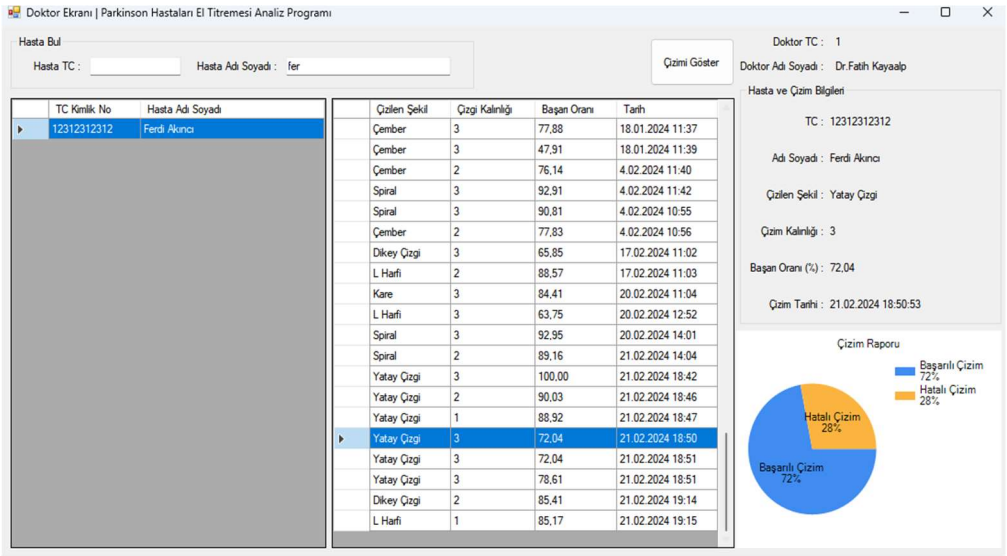
Şekil. 3 Doktor ekranı - hasta kayıtları

C. Çizilecek Şekiller

Yatay çizgi doğruluk hesaplamasında önceden belirlenen koordinat aralığına bakılmaktadır. Çizimler belirlenen koordinat aralığında ise çizimler yeşil renkte, koordinat dışında ise kırmızı renkte renklendirilmektedir. Çizim esnasında tüm koordinat bilgileri hesaplanarak oran hesaplanmaktadır. Çizimi kaydet butonuna tıklandığında sonuçlar veri tabanına kaydedilmektedir. Şekil 4'te yatay kalın çizgi örnek çizimi gösterilmiştir. Şekil 5'te ise yatay kalın çizgi çiziminin raporu gösterilmiştir.



Şekil. 4 Yatay kalın çizgi örnek çizim

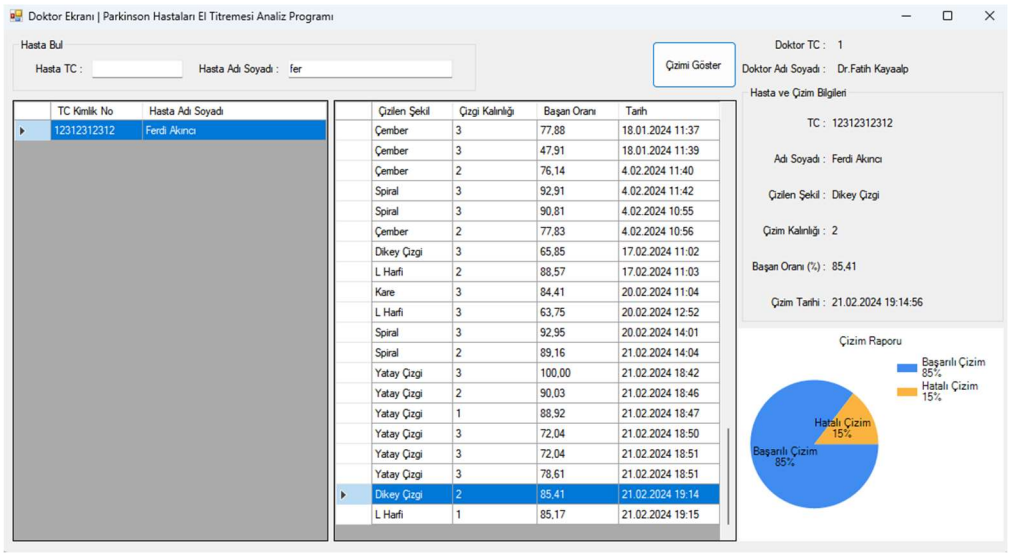


Şekil. 5 Yatay kalın çizgi çizim raporu

Dikey çizgi doğruluk hesaplamasında önceden belirlenen koordinat aralığına bakılmaktadır. Çizimler belirlenen koordinat aralığında ise çizimler yeşil renkte, koordinat dışında ise kırmızı renkte renklendirilmektedir. Çizim esnasında tüm koordinat bilgileri hesaplanarak oran hesaplanmaktadır. Çizimi kaydet butonuna tıklandığında sonuçlar veri tabanına kaydedilmektedir. Şekil 6'te dikey orta kalın çizgi örnek çizimi gösterilmiştir. Şekil 7'de ise dikey orta çizgi çiziminin raporu gösterilmiştir.

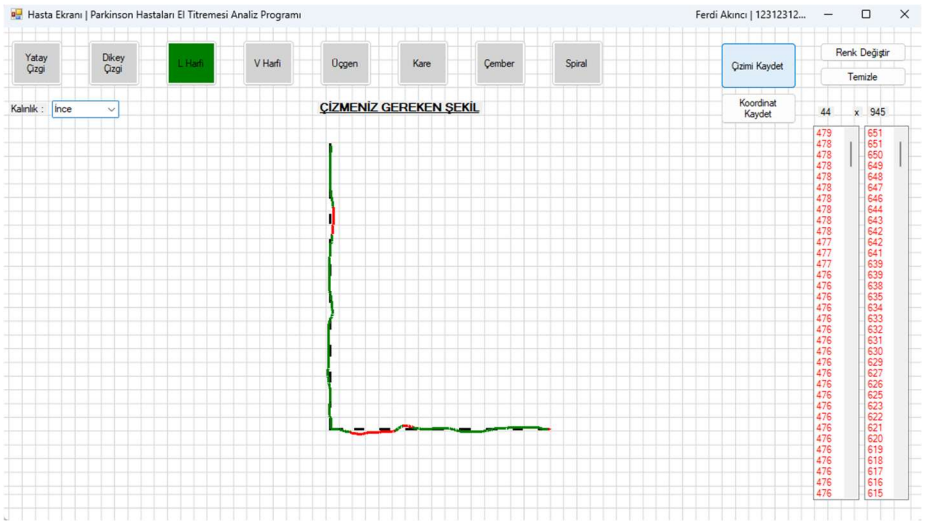


Şekil. 6 Dikey orta kalın çizgi örnek çizim

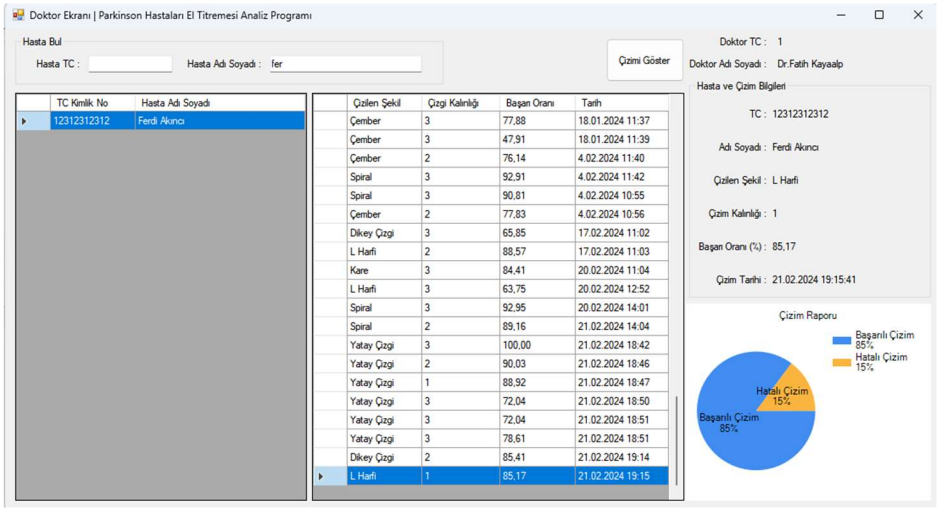


Şekil. 7 Dikey orta kalın çizgi çizim raporu

Dikey ve yatay çizgiden farklı olarak L harfi çiziminde hem dikey çizgi için hem de yatay çizgi için ayrı ayrı koordinat bilgileri belirlenmiştir. Çizimler belirlenen koordinat aralığında ise çizimler yeşil renkte, koordinat dışında ise kırmızı renkte renklendirilmektedir. Çizim esnasında tüm koordinat bilgileri hesaplanarak oran hesaplanmaktadır. Çizimi kaydet butonuna tıklandığında sonuçlar veri tabanına kaydedilmektedir. Şekil 8'de L harfi ince çizgi örnek çizimi gösterilmiştir. Şekil 9'da ise L harfi ince çizgi çiziminin raporu gösterilmiştir.

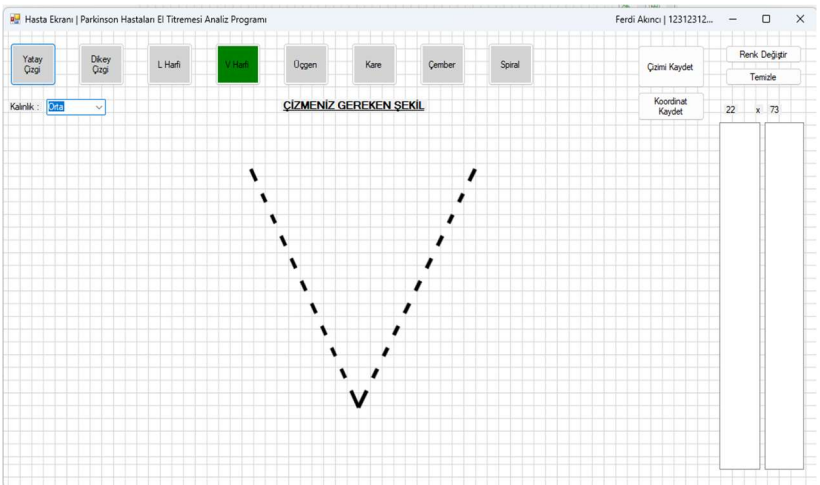


Şekil. 8 L harfi ince çizgi örnek çizim



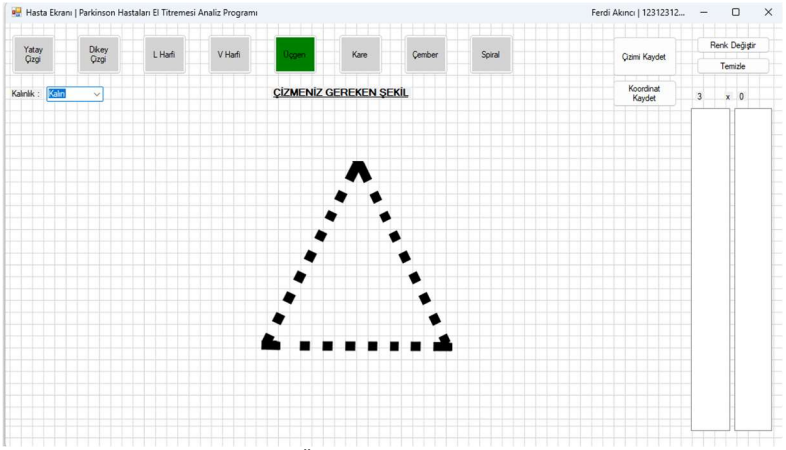
Şekil. 9 L harfi ince çizgi çizim raporu

V harfi çiziminde ekranda gösterilen çizilecek şekil üzerinden doğru koordinat bilgileri alınmıştır. Yazılım içerisinde bu koordinat bilgileri belirtilmiştir. Çizim esnasında koordinat bilgileri alınarak yazılımdaki koordinat bilgileri ile kıyaslanmakta olup +-10 koordinat hesaplaması yapılarak doğruluk oranı hesaplanmaktadır. Şekil 10'da V harfi orta kalınlık çizim ekranı gösterilmiştir.



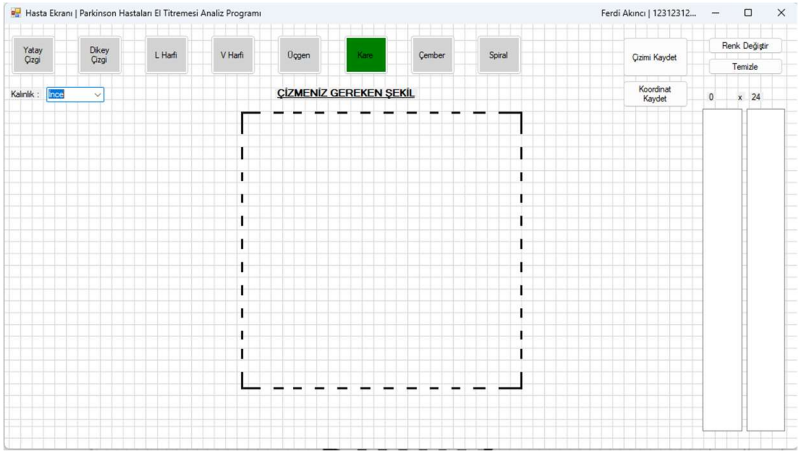
Şekil. 10 V harfi orta kalın çizgi çizim ekranı

Üçgen çiziminde ekranda gösterilen çizilecek şekil üzerinden doğru koordinat bilgileri alınmıştır. Yazılım içerisinde bu koordinat bilgileri belirtilmiştir. Çizim esnasında koordinat bilgileri alınarak yazılımdaki koordinat bilgileri ile kıyaslanmakta olup +-10 koordinat hesaplaması yapılarak doğruluk oranı hesaplanmaktadır. Şekil 11'de V harfi kalın çizim ekranı gösterilmiştir.



Şekil. 11 Üçgen kalın çizgi çizim ekranı

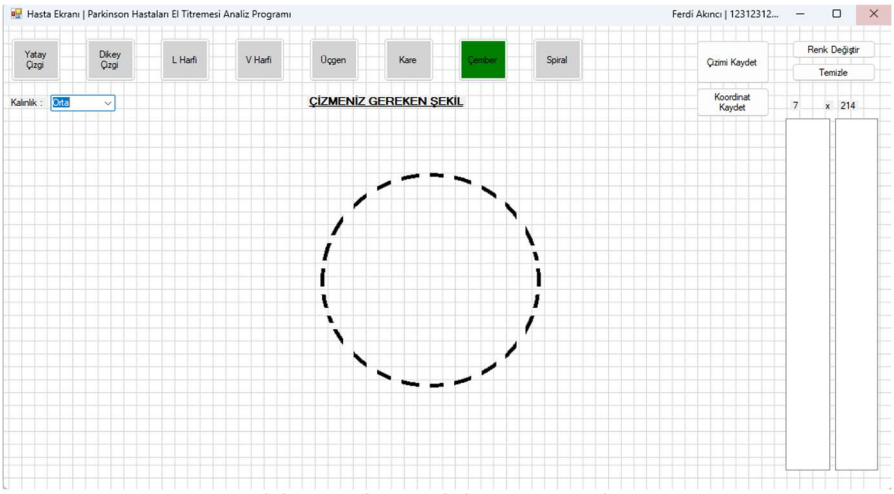
Kare çizimi, L harfi çizimine benzer bir şekilde farklı olarak 4 farklı çizgi koordinat bilgisi belirlenmiştir. Çizimler belirlenen koordinat aralığında ise çizimler yeşil renkte, koordinat dışında ise kırmızı renkte renklendirilmektedir. Çizim esnasında tüm koordinat bilgileri hesaplanarak oran hesaplanmaktadır. Çizimi kaydet butonuna tıklandığında sonuçlar veri tabanına kaydedilmektedir. Şekil 8'de L harfi ince çizgi örnek çizimi gösterilmiştir. Şekil 12'de kare ince çizgi çizim ekranı gösterilmiştir.



Şekil. 12 Kare ince çizgi çizim ekranı

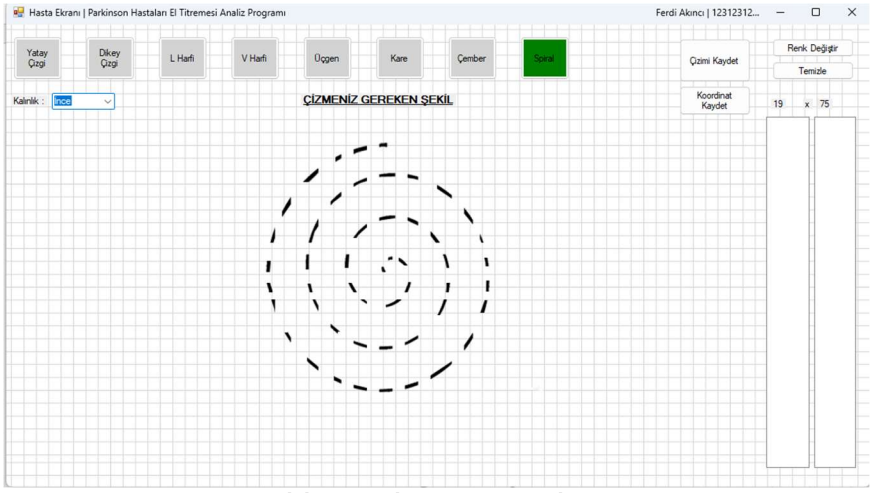
Çember çiziminde çemberin merkez noktasındaki koordinat bilgileri alınmıştır. Belirtilen kesik çizgili çember üzerinde yarıçap uzunluğu hesaplanarak minimum, maksimum değer aralıkları hesaplanmıştır. Çizim esnasında yarıçap minimum, maksimum uzunluk aralığına göre doğruluk hesaplaması yapılmaktadır.

Şekil 13'te çember şekli orta kalınlık çizim ekranı gösterilmiştir.



Şekil. 13 Çember orta kalın çizgi çizim ekranı

Spiral çiziminde V çizime benzer şekilde hesaplanmaktadır. Ekranda gösterilen çizilecek şekil üzerinden doğru koordinat bilgileri alınmıştır. Yazılım içerisinde bu koordinat bilgileri belirtilmiştir. Çizim esnasında koordinat bilgileri alınarak yazılımdaki koordinat bilgileri ile kıyaslanmakta olup +-10 koordinat hesaplaması yapılarak doğruluk oranı hesaplanmaktadır. Şekil 14'te Spiral ince çizgi çizim ekranı gösterilmiştir.



Şekil. 14 Spiral ince çizgi çizim ekranı

III. SONUÇLAR

Parkinson hastalarının el titreme analizi çalışması kapsamında geliştirilen yazılım üzerinde hastanın yapmış olduğu çizimlerdeki koordinat bilgilerine göre çeşitli hesaplama metotlarıyla doğruluk oranları hesaplanmıştır. Önceki çalışmalar araştırıldığında hastaların el titremesindeki durumu gözlemlemek için hastaya kağıtlar sunulmuş olup bu kağıt üzerinde çizimler yapması beklenmiş ve çizim sonuçlarına göre hastalığın ilerleme ya da gerileme durumları analiz edildiği görülmüştür. Bu çalışma ile tüm işlemlerin bir tablet veya bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Yazılım visual studio 2019 yazılım geliştirme ortamında c# yazılım dilinde windows masaüstü uygulaması olarak geliştirilmiştir. İşlemlerin dijital ortamda olması ile birlikte kağıt tüketimi sıfıra indirgenmiştir. Tüm bilgiler bulut altyapısında hazırlanan sunucudaki Microsoft sql server 2019 üzerinde hazırlanan veri tabanına kaydedilmiştir, çizim görüntüleri de bulut altyapısında hazırlanan güvenli paylaşım alanına kaydedilmiştir. Tüm verilerin bulutta saklanmasıyla birlikte verilere yer, zaman ve cihazdan bağımsız bir şekilde erişilebilir olması sağlanmıştır. Doktorlar, hastalarının el titremesinde ilerleme ya da gerileme takibini dijital ortamda takip edebilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmanın web tabanlı geliştirilmesi ile işletim sistemi bağımlılığı da ortadan kaldırılabilir. Veri tabanında toplanan veriler ve ekran görüntüleri ile birlikte ilerleyen çalışmalarda çeşitli yapay zeka algoritmaları ile tahminleme çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] "Controlled Release Of Neurosın Enzyme For Alternatıve Treatment Of Parkınson's Dısease", E. D. Kurtul, 2021

[2] "Parkinson's disease: Mechanisms, translational models and management strategies", C.Raza, R.Anjum, N. A.Shakeel, 2019

[3] "Parkinson Hastalığında Nokturnal Non-Motor (Motor Olmayan) Semptomların Yaşam Kalitesi Ve Bakıcı Yüküne Etkisi" A.Yıldız, 2021

[4] M.C. de Rijk, et al., Prevalence of Parkinson's disease in Europe: a collaborative study of population-based cohorts. Neurologic diseases in the elderly research group, Neurology, 54, S21–S23, 2000.

[5] E.R. Dorsey, et al., Projected number of people with Parkinson disease in the most populous nations, 2005 through 2030, Neurology 68, 5, 384–386, 2007.

[6] "Parkinson Hastalığı Sıçan Modelinde Motor Aktivite Ve İnflamatuvar Sürecin Epigallokateşin Gallat İle Modülasyonu",M.D.Ertuş, 2023

[7] M. E. Mital, "Detection of Parkinson's Disease Through Static and Dynamic Spiral Test Drawings: A Transfer Learning Approach", 13th International Conference on Information and Communication Technology and System, ICTS 2021, ss. 247-251, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Karşıt Akışlı Bir Isı Değiştiricide Farklı Hava Debilerinin Çıkış Hava Sıcaklığına Etkisi

Ozan Bovatekin[1], Özgür Akbulut[2]

[1]Makine Mühendisi, Form Endüstri Tesisleri, Torbalı, İzmir/Türkiye.
[2]Makine Mühendisi, Form Endüstri Tesisleri, Torbalı, İzmir/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: ozan.bovatekin@formgroup.com

ÖZET

Birbirine karışmayan, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla akışkan arasında ısı transferi gerçekleştiren komponentlere ısı değiştirici denir. Genellikle ısı değiştiriciler boru tipi ve plakalı tip ısı değiştiriciler olmak üzere ikiye ayrılır. Akışkanların hareket yönüne göre paralel, karşıt ve çapraz akış olmak üzere üç kategoride değerlendirilirler. Isı değiştiricilerin yüzeyleri düz veya dalgalı olarak alüminyum, epoksi kaplamalı alüminyum, hidrofilik kaplamalı alüminyum lamel olabilir. Lamellerin kalınlıkları 0,12 mm'den 0,2 mm'ye kadar değişmektedir. Bu çalışmada, çapraz akışlı bir ısı değiştiricide farklı hava debilerin çıkış havası sıcaklığı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Etkinlik-NTU metodu kullanılarak, sistem modellenmiştir. Modeldeki ısı değiştirici, 3 sıralı, 8 borulu, 2,5 mm hatveli ve 2 devreli alüminyum kanat – bakır borulu sulu ısı değiştiricidir. Havadaki nem etkileri ihmal edilmiştir ve giriş havası 27°C kuru termometre olarak sabit kabul edilmiştir. Su tarafı giriş/çıkış koşulları 7/12°C olarak sabit tutulmuştur. Hesaplamalarda, hava debisi 300 m^3/h'den; 900 m^3/h değerine yükseltilirken; çıkış havası kuru termometre sıcaklığı 12,9 °C'den 17,17 °C'ye ve su tarafı basınç kaybı 6,4 kPa değerinden, 25,6 kPa değerine yükseldiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı değiştirici, etkinlik-NTU metodu, soğutma kapasitesi, basınç kaybı

The Effect of Different Air Flow Rates on Outlet Air Temperature in a Counterflow Heat Exchanger

Ozan Bovatekin[1], Özgür Akbulut[2]

[1]Mechanical Engineer, Form Endüstri Tesisleri, Torbalı, İzmir/Türkiye.
[2]Mechanical Engineer, Form Endüstri Tesisleri, Torbalı, İzmir/Türkiye

* **Corresponding Author: ozan.bovatekin@formgroup.com**

ABSTRACT

A component that transfers heat between two or more fluids at different temperatures without mixing is called a heat exchanger. Heat exchangers are generally categorized into two types: tube type and plate type heat exchangers. They are evaluated in three categories based on the direction of fluid movement: parallel, counter, and cross-flow. The surfaces of heat exchangers can be flat or corrugated aluminum, epoxy-coated aluminum, or hydrophilic-coated aluminum fins. The thickness of the fins varies from 0.12 mm to 0.2 mm.. The purpose of this study is to examine the effect of different air flows on the outlet air temperature in a counter-flow heat exchanger. The system is modeled using the E-NTU method. The heat exchanger in the model is a 3-row, 8-tube, 2.5 mm fin pitch, and 2-circuit aluminum fin-copper tube water heat exchanger. The inlet air is assumed to be 27°C dry bulb temperature. Humidity effects in the air are neglected. Water side inlet/outlet conditions are maintained at 7/12°C. In the calculations, while the air flow rate is increased from 300 m^3/h to 900 m^3/h, the outlet air dry bulb temperature is increased from 12.9°C to 17.17°C, and the pressure drop on the water side is increased from 6.4 kPa to 25.6 kPa.

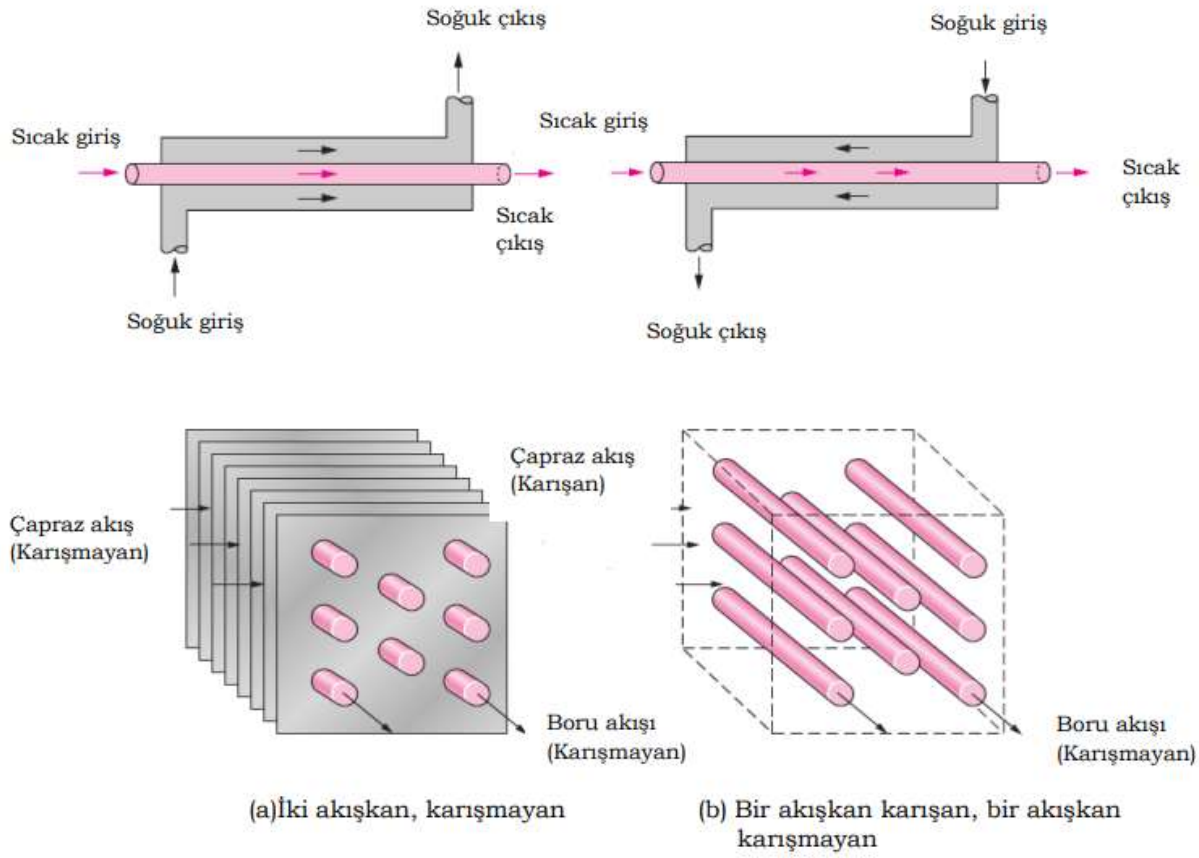
Keywords: Heat exchanger, E-NTU method, cooling capacity, pressure drop

I. GİRİŞ

Birbirine karışmayan, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla akışkan arasında ısı transferi gerçekleştiren komponentlere ısı değiştiricileri denir. Isı değiştiriciler, evlerdeki ısıtma ve havalandırma sistemlerinden büyük fabrikalardaki kimyasal işlem ve güç üretimine kadar çok çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle ısı değiştiriciler, boru tipi ve plakalı ısı değiştiriciler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Akışkanların hareket yönüne göre paralel, karşıt ve çapraz akış olmak üzere üç kategoride değerlendirilirler.

Isı transferi sıcak akışkandan katı yüzeye taşınım ile, yüzeyde iletimle ve bu yüzeyden diğer yüzeye, soğuk akışkana taşınım ile sağlanır. Isı transfer hızı pozitif bir nicelik olarak kabul edilir, ısı transferinin sıcak bir akışkandan soğuk akışkana doğruluğu termodinamiğin ikinci yasasına da uygundur.

Çalışmanın amacı, karşıt akışlı bir ısı değiştiricide farklı hava debilerinin çıkış havası sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemektir. Etkinlik-NTU metodu kullanılarak, sistem modellenmiştir.



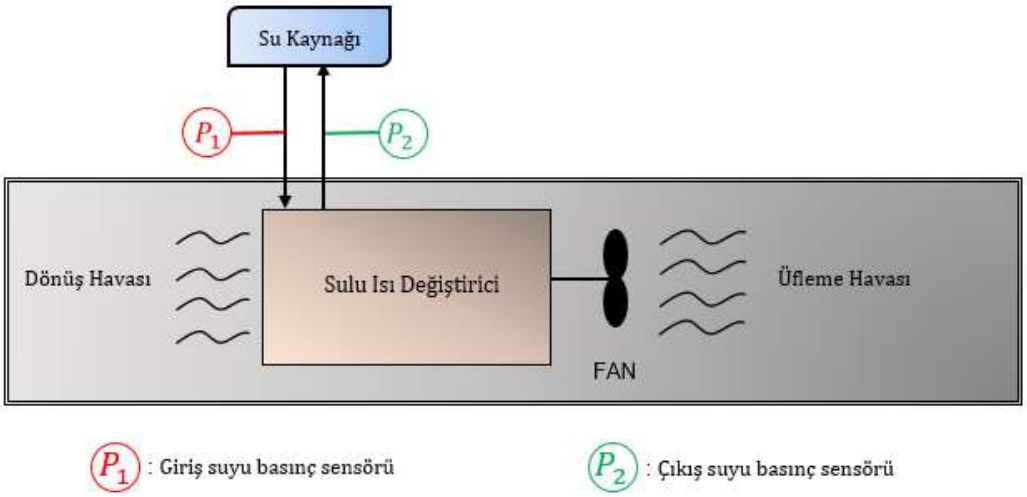
Şekil. 1 Paralel, karşıt ve çapraz akışlı ısı değiştiricilerde farklı akış şekilleri

II. MATERYAL METOT

Modeldeki ısı değiştirici, 3 sıralı, 8 borulu, 2,5 mm hatveli ve 2 devreli alüminyum kanat – bakır borulu sulu ısı değiştiricidir. Toplam ısı transfer katsayısı ve ısı transfer yüzey alanı [1.6] – [2.1] eşitlikleri kullanılarak EES programında ısıl direnç ağ modeli kurulup hesaplanmıştır. Deneyler hava tarafı giriş koşulu sabit 27°C kuru termometre, su tarafı giriş/çıkış koşulları 7/12°C için farklı hava debileri değerleri ile tekrarlanarak yapılmıştır. Yapılan testlerin başlangıç koşulları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Başlangıç parametreleri

No	Hava Debisi [m³/h]	Hava Giriş KT Sıcaklığı [°C]	Su Giriş / Çıkış Sıcaklığı [°C]
1	300	27	7 / 12
2	400		
3	500		
4	600		
5	700		
6	800		
7	900		



Şekil. 2 Modelin şematik gösterimi

Mevcut modelde yapılan kabuller:

Kararlı akış kabul edilmiştir.
Akışkan özellikleri giriş ve çıkış koşullarında değişmemektedir.
Her bir akışkanın özgül ısı değeri giriş koşullarına göre hesaplanmıştır.
Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Isı transferi etkinliği 1.1 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (1.1)$$

Isı değiştiricideki gerçek transfer hızı, sıcak ve soğuk akışkan üzerinde enerji dengesi ile 1.2 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,çıkış} - T_{c,giriş}) = C_h(T_{giriş} - T_{c,çıkış}) \quad (1.2)$$

Soğuk akışkanın ısıl kapasite hızı 1.3 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_c = \dot{m}c_{pc} \quad (1.3)$$

Sıcak akışkanın ısıl kapasite hızı 1.4 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_h = \dot{m}c_{ph} \quad (1.4)$$

C_{min}, C_c ve C_h'nin daha küçük olanıdır.

Bir ısı değiştiricide olabilecek maksimum ısı transferi hızı 1.5 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{max} = \mathrm{C}_{min}\left(T_{h,giriş} - T_{c,giriş}\right) \quad (1.5)$$

Toplam ısıl direnç 1.6 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{tot} = \frac{1}{(UA)} = R_{iç} + R_{f,giriş} + R_{iletim} + R_{dış} \quad (1.6)$$

Su ile boru iç yüzeyi arasındaki taşınım direnci 1.7 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{iç} = \frac{1}{\bar{h}\pi D_{iç} L_{boru}} \quad (1.7)$$

Boru iç yüzeyinde meydana gelen kirlenme direnci 1.8 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{f,iç} = \frac{R"_{f,iç}}{\pi D_{iç} L_{boru}} \quad (1.8)$$

Boru duvarı boyunca iletime karşı direnç 1.9 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{iletim} = \frac{\ln\left(\frac{D_{dış}}{D_{iç}}\right)}{2k_m \pi L_{boru}} \quad (1.9)$$

Hava ile plaka kanatlarının yüzeyi ve borunun dış yüzeyi arasındaki direnç 2.1 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{dış} = \frac{1}{\eta \overline{h_{çıkış}} A_{toplam,dış}} \quad (2.1)$$

NTU ısı transfer birim sayısı 2.2 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$NTU = \frac{UA_S}{C_{min}} = \frac{UA_S}{(\dot{m}c_p)_{min}} \quad (2.2)$$

c kapasite oranı olarak adlandırılan boyutsuz nicelik 2.3 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

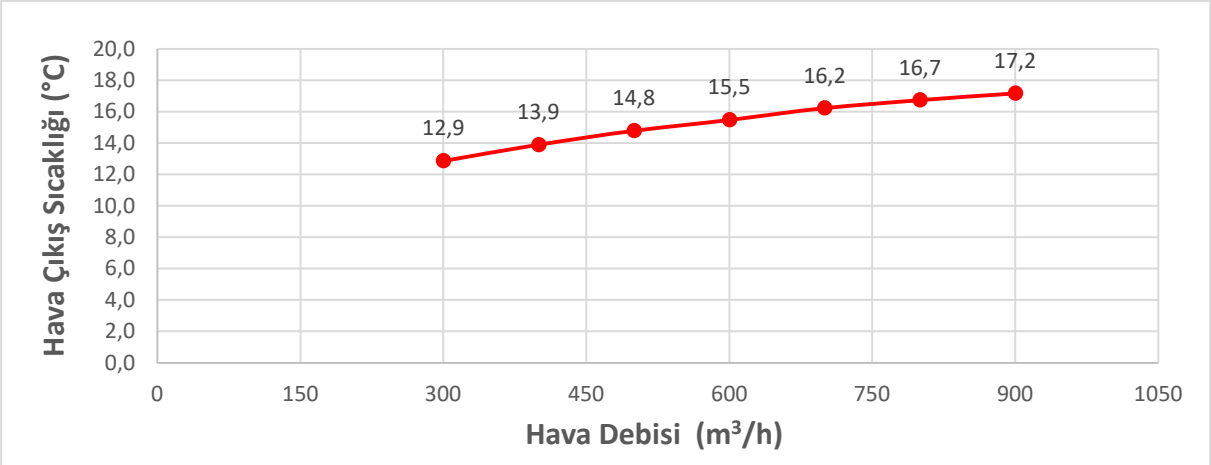
$$c = \frac{C_{min}}{C_{maks}} \quad (2.3)$$

Karşıt akışlı bir ısı değiştiricinin etkinliği 2.4 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{1-\exp[-NTU(1-c)]}{1-c\,\exp[-NTU(1-c)]} \quad (2.4)$$

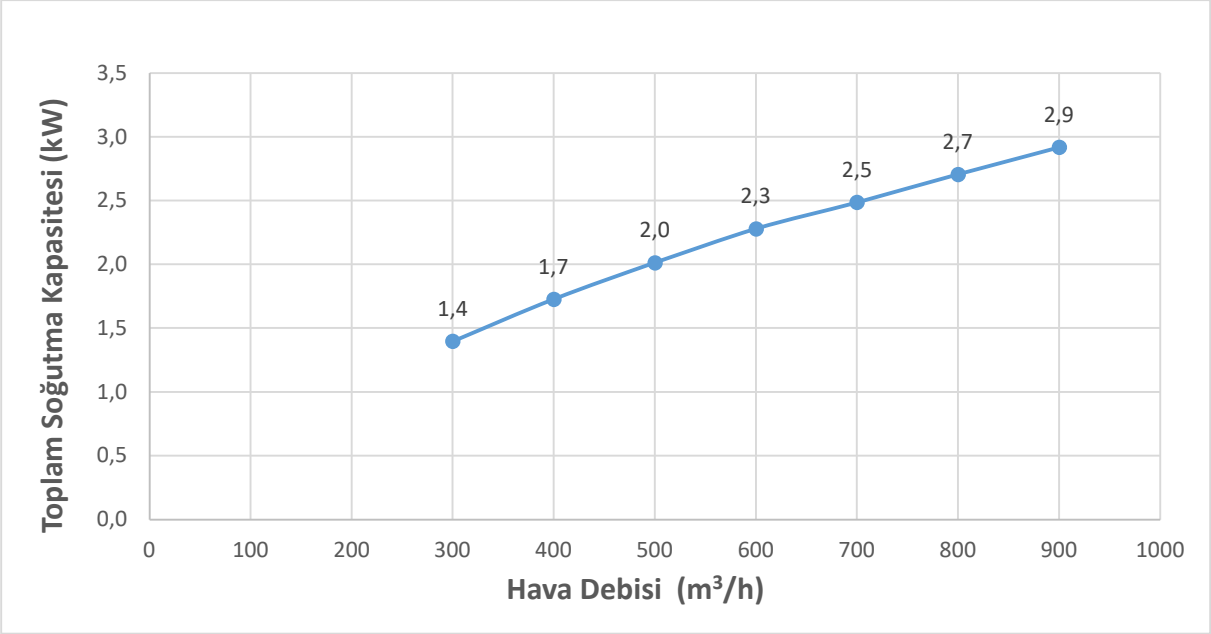
Bir ısı değiştiricinin gerçek ısı transfer hızı 2.5 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} = \varepsilon C_{min}\left(T_{h,giriş} - T_{c,giriş}\right) \quad (2.5)$$



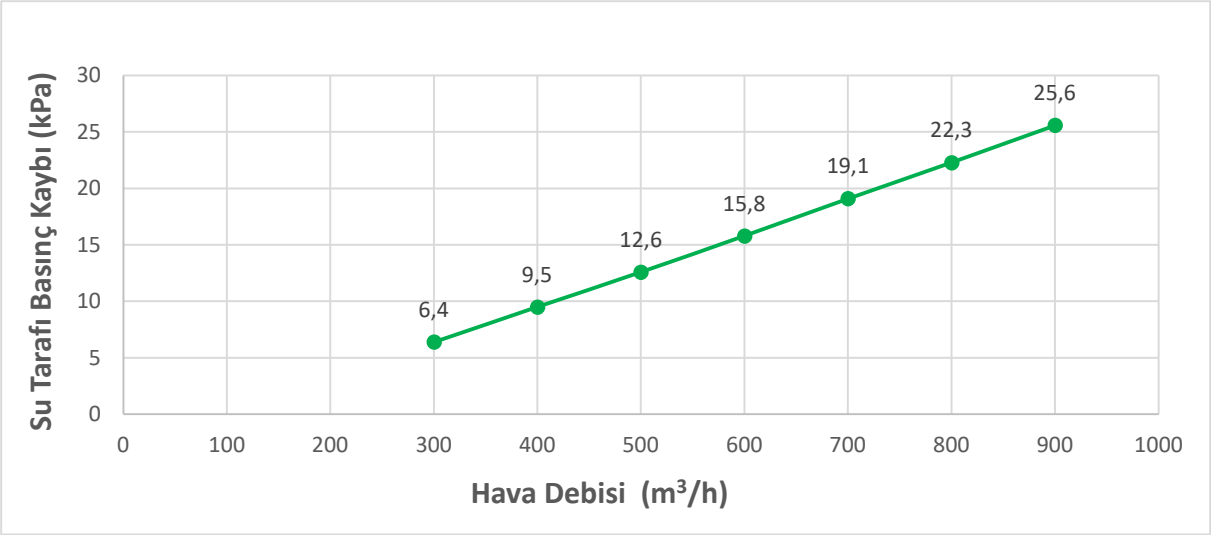
Şekil. 3 Hava debisi artışının çıkış havası sıcaklığı üzerindeki etkisi

Şekil.3'ten, hava debisi artarken hava çıkış sıcaklığının da arttığı görülmüştür. Hava debisi 300m³/h'den ; 900m³/h değerine yükseltilirken; çıkış havası kuru termometre sıcaklığı 12,9 °C değerinden 17,2°C değerine yükseldiği görülmüştür.



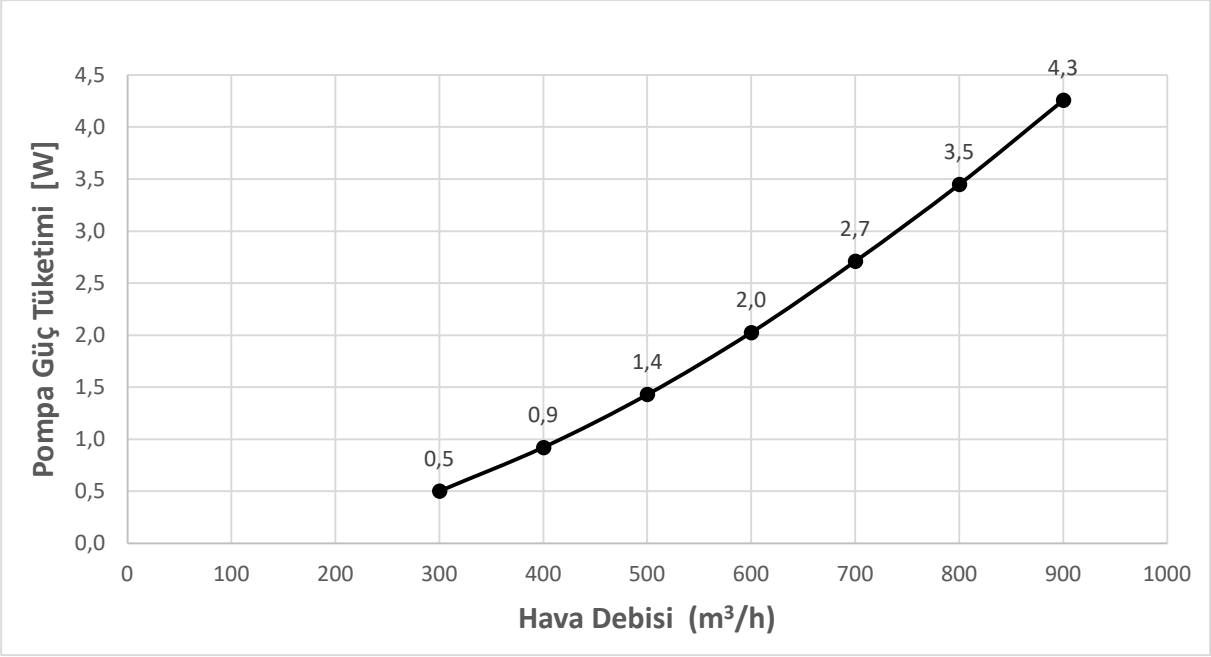
Şekil. 4 Hava debisi artışının soğutma kapasitesi üzerindeki etkisi

Şekil.4'ten, hava debisi artarken soğutma kapasitesinin de arttığı görülmüştür. Hava debisi 300m3/h'den ; 900m3/h değerine yükseltilirken; Soğutma kapasitesi 1,4 kW değerinden 2,9 kW değerine yükseldiği görülmüştür.



Şekil. 5 Hava debisi artışının su tarafı basınç kaybı üzerindeki etkisi

Şekil. 5'ten, hava debisi artarken su tarafı basınç kaybının da arttığı görülmüştür. Hava debisi 300m3/h'den ; 900m3/h değerine yükseltilirken; su tarafı basınç kaybı 6,4 kPa değerinden 25,6 kPa değerine yükseldiği görülmüştür.



Şekil. 6 Hava debisi artışının pompa güç tüketimi üzerindeki etkisi

Şekil. 6'dan, hava debisi artarken pompa güç tüketiminin de arttığı görülmüştür. Hava debisi 300m3/h'den ; 900m3/h değerine yükseltilirken; Pompa güç tüketimi 0,5 W değerinden 4,3 W değerine yükseldiği görülmüştür.

Tablo 2. Hava debisi artışının hava çıkış sıcaklığı, su tarafı basınç kaybı, toplam soğutma kapasitesi ve pompa güç tüketimi üzerindeki eskisi

No	Hava Debisi [m^3/h]	Hava Giriş KT Sıcaklığı [°C]	Su Giriş / Çıkış Sıcaklığı [°C]	Hava Çıkış KT Sıcaklığı [°C]	Su Tarafı Basınç Kaybı [kPa]	Toplam Soğutma Kapasitesi [kW]	Pompa Güç Tüketimi [W]
1	300	27	7 / 12	12,9	6,4	1,4	0,5
2	400			13,9	9,5	1,7	0,9
3	500			14,8	12,6	2,0	1,4
4	600			15,5	15,8	2,3	2,0
5	700			16,2	19,1	2,5	2,7
6	800			16,7	22,3	2,7	3,5
7	900			17,2	25,6	2,9	4,3

IV. TARTIŞMA

Hava debisi 300m3/h'den ; 900m3/h değerine yükseltilirken:

Çıkış havası kuru termometre sıcaklığı 12,9 °C değerinden 17,2°C değerine yükselmiştir. %33 artış göstermiştir.

Soğutma kapasitesi 1,4 kW değerinden 2,9 kW değerine yükselmiştir. %109 artış göstermiştir.

Su tarafı basınç kaybı 6,4 kPa değerinden 25,6 kPa değerine yükselmiştir. %300 artış göstermiştir.

Pompa güç tüketimi 0,5 W değerinden 4,3 W değerine yükselmiştir. %747 artış göstermiştir.

V. ÇIKARIM

Sıcak ve soğuk akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıkları bilindiği veya bir enerji dengesinden çıkarılabildiği zaman, Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı Yöntemi (LMTD) kullanılması kolay olacağından uygundur. Ancak ısı değiştirici çözümlenmesinde karşılaşılan ikinci tür problem, ısı değiştiricisinin tipi ve boyutu belirli olduğunda, ısı transferi ve belirli kütle debileri ve giriş sıcaklıkları için sıcak ve soğuk akışkanların çıkış sıcaklıklarının bulunmasıdır. Dolayısıyla bu durumda ısı değiştirgecinin ısı transfer yüzey alanı bilinmekte fakat çıkış sıcaklıkları bilinmemektedir. Burada amaç belirli bir ısı değiştirgecinin ısı transferini başarıp başaramayacağını bulmak veya mevcut bir ısı değiştirgecinin bunu yapıp yapamayacağını tespit edebilmektir. Bu olayda da LMTD yöntemi kullanmak mümkün olabilirse de çok külfetli iterasyonlar gerektirmektedir. Bu amaçla etkinlik-NTU yöntemi bulunmuştur. Bu çalışmada, çapraz akışlı bir ısı değiştiricide farklı hava debilerin çıkış havası sıcaklığı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Etkinlik-NTU metodu kullanılarak, sistem modellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Sonsuz destekleri ve bilgimizin sınırlarını zorlamamız için ilham veren meslektaşlarım; Ar-GE Yöneticisi Göknil AĞAR, Ar-Ge Şefi Cansu Fındık ve Ar-Ge Mühendisi Kadir Oğuzhan Ünüştü'ye içtenlikle şükranlarımı sunuyorum.

KAYNAKLAR

[1] Nijman, Jan (2020). Geography: Realms, Regions, and Concepts (20. bas.). Wiley. ISBN 978-1119607410.
[2] Cengel, Yunus A., Michael A. Boles. Thermodynamics: an engineering approach. Vol. 8. New York: McGraw-hill, 2015.
[3] Klein, Sanford, and Gregory Nellis. Thermodynamics. Cambridge University Press, 2012.
[4] Kakac S, Lui H, 2002. Heat exchangers. Selection,Ratingand thermal design,Second edi,Crcpress,Florida,
[5] Incropera, F., P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Student Study Guide and Solutions Manual

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Ortorombik Kristal Yapıya Sahip Tek Katmanlı FeB Malzemenin Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliğinin DFT Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi

Hakan ÜŞENTİ[a], İzzet Paruğ DURU[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Programı, Düzce/Türkiye.
[b]İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik Meslek Yüksekokulu, Tıbbı Görüntüleme Programı, İstanbul/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** hakanusenti@duzce.edu.tr

ÖZET

Elektrikli cihazların kullanımı, yüksek gerilim hatları, radio-TV vericileri, bazı endüstriyel ve tıbbı cihazlar ve özellikle kablosuz iletişimin artması beraberinde elektromanyetik kirliliğin artması gün geçtikçe canlı sağlığını, hassas sistemlerin çalışmalarını ve yüksek hassasiyet gerektiren ölçümleri tehlikeye sokmaya başlamıştır. Büyük bir çevresel kirliliğe dönüşmüş olan elektromanyetik radyasyondan korunmanın en etkili yolu elektromanyetik kalkanlama yapmaktır. Farklı sektörlerin çeşitli uygulama alanlarının ihtiyacına cevap verebilecek kalkanlama malzemelerinin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Grafenin keşfinden sonra iki boyutlu (2D) malzemelere olan ilgi artarak devam etmektedir. Bu çalışmada, MXene sonrası malzemeler olan MBene sınıfına ait ortorombik kristal yapıya sahip ve cmcm uzay grubunda bulunan FeB molekülünden elde edilmiş film tabaka, ab-initio metotlar kullanılarak incelenmiştir. FeB yapısı, yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) kullanılarak incelenerek elektronik yapısı, optik özellikleri ve zırhlama etkisi detaylı olarak incelenmiştir. FeB nanoparçacıklar kullanılarak elde edilen tek katmanlı film yapının 20 dB seviyelerinde kalkanlama performansı göstermesi nano boyutlarda kalkanlama malzemelerinin üretilmesi ve uygulanması için umut vericidir.

Anahtar Kelimeler: ab-initio, DFT, Elektromanyetik kalkanlama, FeB

Investigation of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Monolayer FeB Material with Orthorhombic Crystal Structure Using DFT Method

ABSTRACT

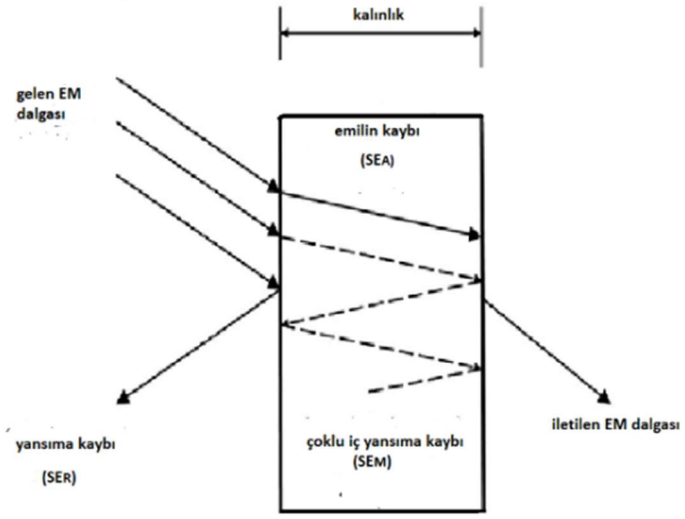
The use of electrical devices, high-voltage lines, radio-TV transmitters, some industrial and medical devices and especially the increase in electromagnetic pollution with the increase in wireless communication has started to endanger the health of living beings, the operation of sensitive systems and measurements requiring high precision. The most effective way to protect against electromagnetic radiation, which has become a major environmental pollution, is electromagnetic shielding. Work is ongoing to develop protective materials that can meet the needs of various application areas in different sectors. After the discovery of graphene, interest in two-dimensional (2D) materials continues to increase. In this study, the film layer obtained from the FeB molecule, which has an orthorhombic crystal structure and is located in the cmcm space group, belonging to the MBene class, which are post-Mxene materials, was investigated using ab-initio methods. The structure of iron-doped boron (FeB) has been investigated using density functional theory (DFT) and its electronic structure, optical properties and armoring effect have been studied in detail. The single layer film structure obtained using FeB nanoparticles shows shielding performance at 20 dB levels, which is promising for the production and application of shielding materials at nano-scale.

Keywords: *ab-initio, DFT, Electromagnetic shielding, FeB*

I. GİRİŞ

Günlük yaşamda sıkça karşılaştığımız kablosuz iletişim cihazları, radyo sinyalleri, güç iletimi gibi teknolojik araçların ürettiği elektromanyetik alanlar elektromanyetik kirliliğin başlıca nedenidir. Bu kirliliğin toplam etkisi çoğu zaman herhangi bir doğal elektromanyetik alanın ya da radyasyon kaynağının etkisinden çok daha güçlüdür [1]. Elektromanyetik alanlar fiziksel özellikleri açısından farklılık gösterseler de uzun süre maruz kalınan tüm frekans ve dalga boyu aralıklarındaki manyetik alanlar sağlık üzerinde zararlı etki endişesine yol açmaktadır [2]. Dalga boylarındaki farklılıkları nedeniyle ışık, ısı, X-ışını ve gama ışınları gibi farklı formlarda karşımıza çıkan elektromanyetik radyasyon insan sağlığını riske atmanın yanı sıra içerisinde barındırdığı enerji parçacıkları ve dalgaların bir ortam içerisinde seyahat edebilme yeteneğinin neden olduğu girişim etkisi de hassas makinelerin ve ekipmanların kararlı çalışmalarını tehlikeye sokarak arızalanmalarına ve performanslarının düşmesine neden olmaktadır. Elektromanyetik girişim (EMI) geniş bant ve dar bant girişimi olarak karşımıza çıkabildiği gibi doğal kaynaklıda insan kaynaklıda olabilir. Her halükârda elektromanyetik girişim ile başa çıkabilmek için sistematik bir yaklaşım gereklidir. Ekipmanların veya bileşenlerin elektromanyetik ortamdaki bağışıklığı olarak tanımlanabilen elektromanyetik uyumluluk EMI etkilerine karşı koruma sağlayan bir kontrol mekanizmasıdır [3].

Elektromanyetik radyasyondan korunmanın en etkin yolu, belirlenmiş bir alanın ya da malzemenin EMI'yi engelleyebilecek bir malzeme ile kaplanması ya da zırhlanmasıdır. Kalkanlama olarak da isimlendirilen bu işlem için kullanılacak olan malzemelere ise kalkanlama malzemesi olarak isimlendirilir. Elektromanyetik dalga tek katmanlı kalkanlama malzemesi ile etkileşime girdiğinde kalkan ve hava arasındaki empedans uyumsuzluğu nedeni ile bir kısmı yüzeyden yansıyacak, geri kalan kısmı ise kalkan içerisinde ısı enerjisi olarak emilerek dağılacaktır [5]. Kalkanın iç kalınlığında ikincil yansıma ve kırılmaların etkisi ana yansıma ve soğrulma etkisinin yanında çok küçük bir etkiye sahip olduğu için çoğunlukla ihmal edilebilecek seviyelerdedir.



Şekil 1. EMI koruma mekanizmasının şematik gösterimi [6].

Kalkanın gelen elektromanyetik dalgalara karşı elektromanyetik girişim koruma etkinliği (SE) denklem (1) de görüldüğü üzere gelen ve iletilen gücün (P) ya da elektrik alan yoğunluğunun (E) logaritmik oranı olarak ifade edilir ve birimi dB'dir [7].

$$SE_T(dB) = 10log\frac{PT}{PI} = 20log\frac{ET}{EI} \quad (1)$$

Schelkunoff teorisi denklem (2) de gösterildiği gibi toplam kalkanlama etkinliğinin; yansıma (SER), soğurma (SEA) ve çoklu yansıma (SEM) yoluyla elde edilen zayıflamaların toplamı olduğunu belirtmektedir [7].

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (2)$$

Kalkanlama amacı ile kullanılacak olan malzemelerde istenen özellikler arasında kimyasallara ve korozyona dayanıklı olmaları, hafiflik ve esneklik, ayarlanabilir morfolojik yapı, işlenebilme kolaylığı ve ucuz olmaları sayılabilir. Gelen elektromanyetik radyasyonu perdeleyebilen ve bu kriterleri karşılayabilecek olan malzemelerin sentezlenmesi ve imalatı günümüzde aktif bir araştırma konusudur [4].

Literatüre bakıldığında elektromanyetik kalkanlama ile ilgili çalışmalarda başta karbon malzemeler olmak üzere, metaller, iletken polimerler ve iletken polimer kompozitlerin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.

EMI engellenebilmesi için kullanılan metal bazlı koruyucu malzemeler ağırlıkları, korozyondan etkilenmeleri ve koruyucu verimliliklerinin ayarlanma zorlukları nedeni ile, karbon bazlı koruyucu malzemeler ise sınırlı mekanik esneklikleri nedeni ile dezavantajlı durumda olduklarından metal ve folyo tarzı geleneksel malzemelere göre çeşitli avantajlara sahip olan polimer kompozitleri oluşturmak için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu metodların en etkili olanlar arasında nanokarbonlar ve manyetik nanopartiküller gibi nanomateryallerin polimerik bir matrise dahil edilmesi ile polimerlere göre çok daha iyileştirilmiş kalkanlama performansı sergileyen polimer kompozitlerin elde edilmesidir [4-8]. Karbon siyahı, karbon elyafı, grafit ve grafen kalkanlama malzemesi olarak uygun adaylar gibi görülseler de bazı gafit türevleri hariç dış etkenlere dayanımlarının arttırılması için taşıyıcı bir faza ihtiyaç duymaları dezavantajlarıdır [9]. Nanokompozitler hafiflikleri, esnek yapıda olmaları, korozyon dayanımları ve uygulama kolaylıkları gibi avantajları nedeniyle kalkanlama malzemesi olarak metallerin önüne geçerek popüler hale gelmişlerdir [10].

Çığır açıcı bir sıçrama olarak görebileceğimiz ve termodinamik kararsızlığı nedeni ile sentezlenemeyeceğine inanılmasına rağmen 2004'te Kostya ve arkadaşları tarafından tek tabaka halinde sentezlenebilmiş olan grafen düzlemsel iki boyutlu malzemelere (2D) geçiş niteliğinde olmakla birlikte sergilediği fiziksel ve kimyasal özellikleri, üzerinde gözlemlenen kuantumsal olgular (kütlesiz Dirac fermiyonları, anormal kuantum hall etkisi, Klein paradoksu gibi) oldukça dikkat çekicidir [11].

Grafenin bu başarısı aynı zamanda akıllı malzemeler ve iki boyutlu tek tabakalı malzemelerin de önün açarak yeni malzemelerin keşfine zemin hazırlamıştır [12].2D malzemelerin keşfi ve üretim sürecinin en ilgi çekici eklemeleri geçiş metali karbürleri, nitrürler ve karbonitrür yapıları (yani MXene'ler) dir. Atomik katmanlı MXene'ler MAX fazlarının toplu katmanlı ebeveynlerinden seçici olarak aşındırılması ile elde edilirler. Bileşimlerine göre adlandırılan MAX fazlarında; M bir geçiş metali, A çoğunlukla 3A be 4A sütunlarında bulunan bir element X ise karbon (C) veya nitrojen (N) dir [13,14]. MAB fazlarındaki A atom katmanlarının (A çoğu zaman alüminyumdur) seçici olarak çıkarılması ile elde edilebilen MBene'lerin tamamı elektron transfer verimliliği yüksek iyi metalik özellik sergilemektedirler. MBene yapısında ki M bir geçiş metalini B ise borunu temsil etmektedir [15,16].

2 boyutlu (2D) geçiş metali borürleri üçlü borür grubundan elde edilebildiği için MBenes olarak adlandırılmaktadır. MBene'ler borun 2 boyutlu malzemelerin performanslarındaki rolünü keşfetme fırsatı sunmaktadırlar. 2 boyutlu bor bazlı sistemleri elde etmenin pratik bir yolu bor ve çeşitli geçiş metallerinden birinin kullanılmasıdır. Bu durumda geçiş metal, bor tabakasını stabilize etmek için bora elektron verirken, aynı zamanda geçiş metali merkezi koordineli bir şekilde 2 boyutlu borür malzemelerin çeşitliliğine katkı sağlamış olur [16].

Etkili bir EMI kalkanlama malzemesinin dizayn edilebilmesi için iletkenlik ve manyetik geçirgenlik çok önemli parametrelerdir. İdeal bir EMI kalkanlama materyali, elektrik ve manyetik geçirgenlikten etkilenen kompozitlerin empedans eşleştirme özelliğine sahip olmalıdır. GHz aralığında kullanımlarını maksimum ferromanyetik malzemelerde sınırlandırır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, araştırmacılar nano veya mikro malzemelere odaklanmıştır, çünkü bu tip malzemeler girdap akım kaybını azaltır. Organik ve inorganik bileşenli birçok yapı EMI kalkanlama açısından belli bir enerji spektrumda etkili olmakla birlikte bu araştırma kapsamında FeB kristali kullanılmaktadır. Son yıllarda, Fe içeren nano yapıların tasarımı büyük ölçüde artmıştır. Bunun nedeni, nano ölçekteki yapıların, yüksek boy/en oranı, gözenekliliği ve yığın yapılara kıyasla yüksek manyetik momenti (süperparamanyetik davranış) gibi birçok avantajı bulunmasıdır.

II. MATERYAL METOT

Araştırma kapsamında cmcm uzay grubunda ortorombik kristal yapıya sahip FeB'nin kalkanlama verimliliği üzerine odaklanılmıştır. Kafes parametreleri; örgü parametreleri a=4.022Å, b=4.022 Å ve c=2.958 Å; açıları ise $\alpha = 90.000°$ $\beta = 90.000°$ $\gamma = 137.865°$ dir. FeB'nin birim hücre hacmi V, 32.110Å3 kadadır. Ferromantetik (FM) halde bulunmayı tercih eden FeB'nin yapısal, elektriksel ve optic özellikleri, genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı (GGA) ve Perdev-Burke-Ernzerhov (PBE) fonksiyoneli kullanılarak hesaplanmıştır. Yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) çerçevesinde gerçekleştirilen hesaplamalarda CASTEP

[castep referans] paket yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca bu nano parçacıklardan elde edilmiş olan iki boyutlu (2D) film tabakanın kalkanlama etkinliği de detaylı bir şekilde teorik olarak incelenmiştir.

Ab-initio yöntemler ile FeB'nin yapısal, elektronik ve optik karakterizasyonu yapılarak gelen ω foton frekansına bağlı lineer dielektrik fonksiyonu ε(ω)'nin gerçek (εı) ve imajiner (εıı) kısımları hesaplanmıştır. Denklem 3, Denklem 4, Denklem 5 ve Denklem 6'da açıkça görüldüğü gibi, soğurma ve yansımanın hesaplanmasında dielektrik fonksiyonundan faydalanılmaktadır.

$$n(\omega) = \left[\frac{\sqrt{{\varepsilon_1}^2(\omega)+{\varepsilon_2}^2(\omega)}+\varepsilon_1(\omega)}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k(\omega) = \left[\frac{\sqrt{{\varepsilon_1}^2(\omega)+{\varepsilon_2}^2(\omega)}-\varepsilon_1(\omega)}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega\sqrt{2}}{c}\left[\sqrt{{\varepsilon_1}^2(\omega)+{\varepsilon_2}^2(\omega)}-\varepsilon_1(\omega)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$R(\omega) = \frac{(n(\omega)-1)^1+k^2(\omega)}{(n(\omega)+1)^1+k^2(\omega)} \quad (6)$$

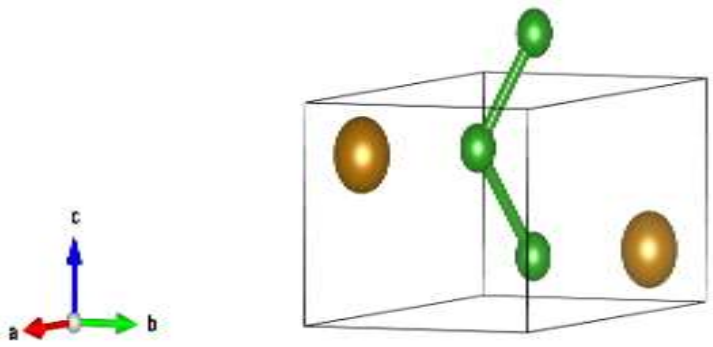
Burada n(ω), k(ω), α(ω) ve R(ω) sırasıyla kırılma indisi, sönümlenme katsayısı, soğurma ve yansımayı temsil etmektedir. DFT yöntemiyle geometri optimizasyonunun incelenmesi kalkanlama verimliliğinin (SE) hesaplanması için öncelikli adımdır. Optimizasyon sonrası taban durumu enerji hesaplamaları yapılarak malzemenin elektriksel ve optik özellikler ortaya çıkarılmıştır. Hem soğurulma kalkanlaması hem de yansıma kalkanlaması Denklem 7 ve Denklem 8 vasıtasıyla ortaya çıkarılmıştır. Denklem 9 ise toplam kalkanlama verimliliğini ifade etmektedir.

$$SE_A = 10log\left(\frac{1-R}{T}\right) \quad (7)$$

$$SE_R = 10log\left(\frac{1}{1-R}\right) \quad (8)$$

$$SE_A(dB) = SE_A + SE_R = 10log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

Malzemenin yapısal özelliklerini belirleyerek bu özelliklerle direk ilişkili olan manyetik özellikleri hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu çalışmada manyetik ve elektronik özelliklerin bağ uzunlukları ve bağ açıları ile ilişkisine bakarak atomik morfoloji ile malzemenin kalkanlama etkinliği arasındaki ilişkide incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan FeB'ye ait birim hücre Şekil.2'de gösterilmiştir.



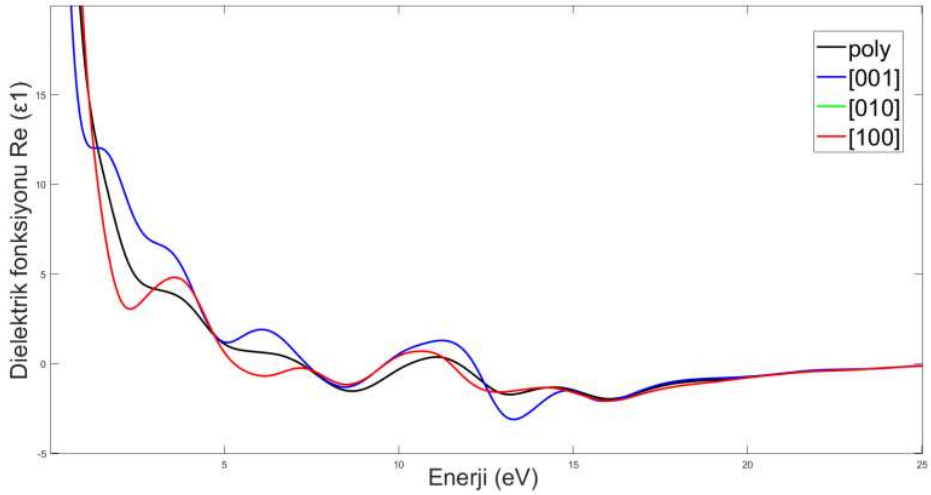
Şekil 2. FeB birim hücresi (sarı renkli atomlar Fe, yeşil renkli atomlar ise B atomunu temsil etmektedir.

Yoğunluk fonksiyonel teorisi ile elektron yoğunluğu ile enerji fonksiyonu arasındaki ilişkiyi belirleyebileceğimiz Orbitallere bakarak kinetik enerji ve elektron yoğunluğu Kohn-Sham metodu kullanılarak elde edilebilecektir. Bu çalışmada popüler bir GGA fonksiyoneli olan PBE kullanılmıştır. Geometri optimizasyonundaki yakınsamanın derecesi diğer iş akışındaki DFT hesaplamaları için önem arz

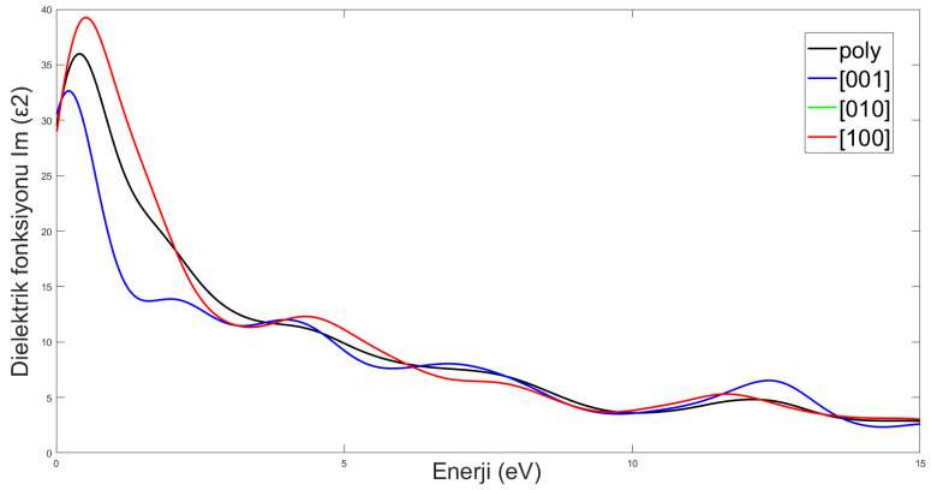
etmektedir. Atomlar arasındaki bağ uzunlukları ve açıları, orbital hibritleşme, doğrudan ya da dolaylı takas etkileşmeleri, yük taşınımı ve spin yönelimleri gibi önemli fiziksel özellikleri etkilemektedir. Kristal alan teorisinde (CFT), d-orbitali yüksek enerji bölgesi (eg) ve düşük enerji bölgesi (t2g) olarak iki parçaya ayrılabilir [17]. Geçiş elementlerinin bulunduğu yapılarda özellikle d-orbitalindeki dejenerasyon ortadan kaldırılarak t2g ve eg arasındaki enerji farkı belirgin hale gelmektedir. Bu orbitallerdeki elektron yerleşimi eşlenmemiş spin ve toplam manyetik moment hakkında bilgi vermektedir.

2.1. Enerji Hesaplamaları: Dielektrik Fonksiyonu ve Optik Özellikler

Frekansa bağlı dielektrik fonksiyonun hesaplanması ile elde edilen dielektrik tensörü kullanılarak malzemenin soğurma, yansıma ve geçiş katsayıları hesaplanmıştır. Perdev-Burke-Ernzerhov (PBEsol) fonksiyoneli ve genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı (GGA) kullanılarak FeB'un ferromanyetik (FM) olduğu durum incelenmiştir. FM durumdaki FeB'ye fotonun geliş yönüne ([001], [010], [100]) bağlı olarak malzemedeki dielektrik fonksiyonu ε(ω)'nin gerçek (ε^{I}) ve imajiner (ε^{II}) kısımlarındaki değişim enerjiye bağlı olarak Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Dielektrik fonksiyonun gerçek kısmının (ε^{I}) enerjiye bağlı değişim grafiği



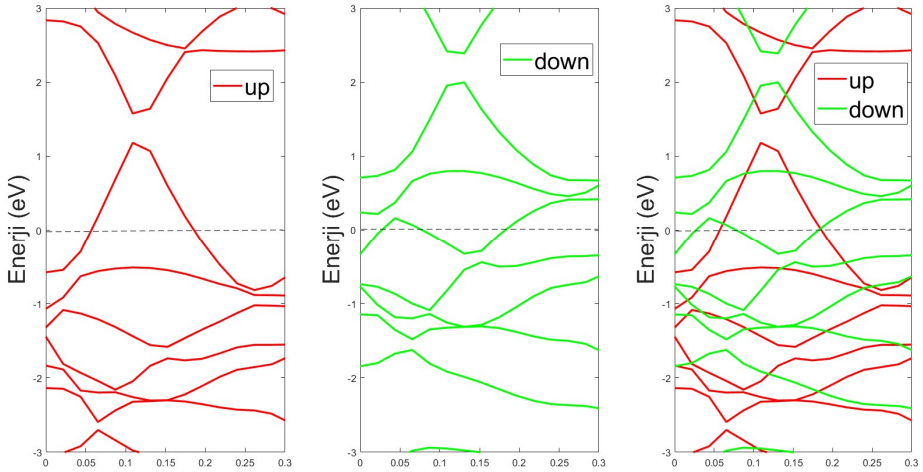
Şekil 4. Dielektrik fonksiyonun imajiner kısmının (ε^{II}) enerjiye bağlı değişim grafiği

2.2. Elektriksel Özellikler ve Taban Durumu Çözümü

Sistemin elektronik ve manyetik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlayan durum yoğunluğu (DOS) ve bant yapısı tek kristal MBene/MXene FexB için hesaplanmıştır. Blöch düzeltmesi ile tetrahedron metodu toplam enerji ve DOS hesaplamalarında tutarlı sonuç vermektedir. Bant yapıları spin polarize

durumlar için (major ve minor kanallar) elde edilip; band aralığının, valans bantı maksimumu (VBM) ve iletim bantı minimumu (CBM) bulunarak elde edilmiştir. Böylece yapının metal, yarı iletken veya yalıtkan hali ortaya çıkartılabilmektedir.

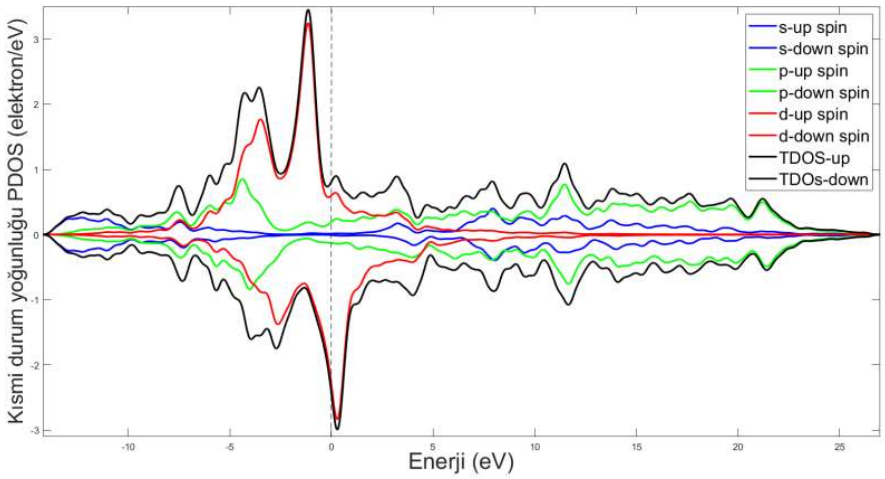
Şekil 5'te FM FeB'nin major ve minor spin kanallarının bant yapısı gösterilmektedir. Fermi seviyesinin sıfıra ayarlanmış olduğu elektronik band yapısı görülmektedir. İletim ve valans bandı arasındaki enerji farkının minimum olması ve yer yer üst üste binmiş olması malzemenin matelik durumu ve iletim kabiliyeti hakkında fikir vermektedir. Bant yapısı incelendiğinde FeB'nin metalik özellik gösterdiği anlaşılabilmektedir. Major ve minor spin kanalları ele alındığında yukarı ve aşağı yönlü spinler durumları için FeB metalik özellik göstermekle beraber yarı-metallik bir davranış ortaya çıkmamaktadır.



Şekil 5. FM durumdaki FeB'nin elektronik bant yapısı grafiği

Dalga uzayında iletim ve valans bölgeleri enerji bantları kullanılarak malzemenin topolojik elektronik karakteri belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin manyetik özellikleri hakkındaki durum yoğunluğu (DOS) ölçümlerinden bilgi sahibi olunmuştur. Kısmı durum yoğunluğu (PDOS) grafikleri ile malzemenin elektronik yapısı hakkında niteliksel bilgiler elde edilmiş olmaktadır. Fermi seviyesinin yakın çevresinde ortalama net mıknatıslanmanın varlığı, Şekil 6'daki azınlık spin kanalındaki durum yoğunluğunun major bölgeden daha olmasıyla açıklanabilmektedir. Burada FeB'nin FM haline B-p ve Fe-d orbitalleri önemli katkı sunmaktadır. Bir p-d hibritleşmesi FM davranışın önemli nedenlerinden biridir.

Aşağıda ferromanyetik özellikli FeB'ye ait PDOS ve bunların toplamlarından elde edilmiş olan TDOS grafiği gösterilmiştir.



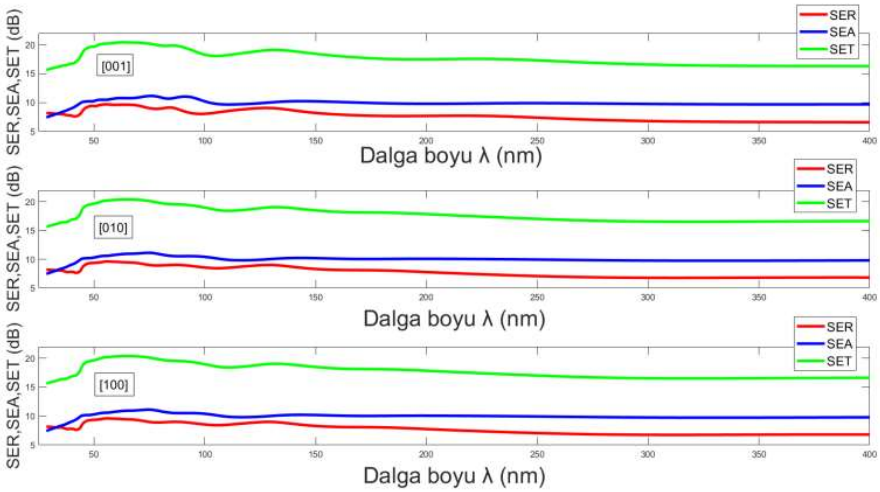
Şekil 6. FM durumdaki FeB'nin kısmı durum yoğunluğu (PDOS) grafiği

2.3. Elektriksel Özellikler ve Taban Durumu Çözümü

Frekansa bağlı dielektrik fonksiyonu hesaplandıktan sonra soğurma katsayısı α(ω), kırılma indisi η(ω), yansıma R(ω), sönümlenme katsayısı K(ω) ve kayıp enerji fonksiyonu L(ω), fotonun enerjisine bağlı olarak hesaplanmıştır [19]. Yansımadan (SER) ve soğurmadan (SEA) kaynaklı kalkanlama etkinlikleri ile toplam kalkanlama etkinliğinin (SET) hesaplanması için yansıma (R) ve geçirgenliğe (T) bağlı materal metot bölümünde ayrıntılı bir şekilde verilmektedir.

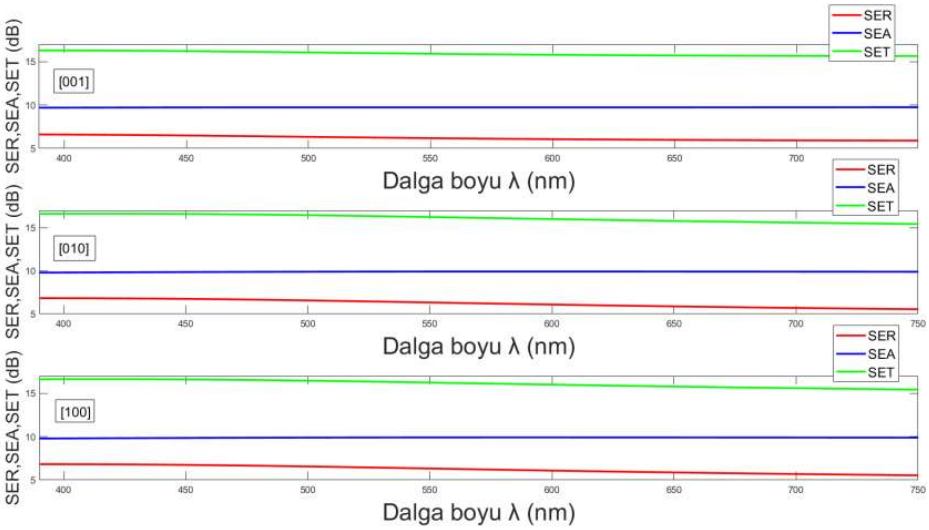
Burada çoklu iç yansımaların (SEM) etkisi oldukça küçük olduğu için ihmal edilmiştir [20].

Şekil 7 ortorombik kristal yapıdaki tek katmanlı FeB malzemenin ultraviyole bölgede (10-400 nm) yansıma (SER), soğurma (SEA) ve toplam (SET) kalkanlama etkisini göstermektedir.



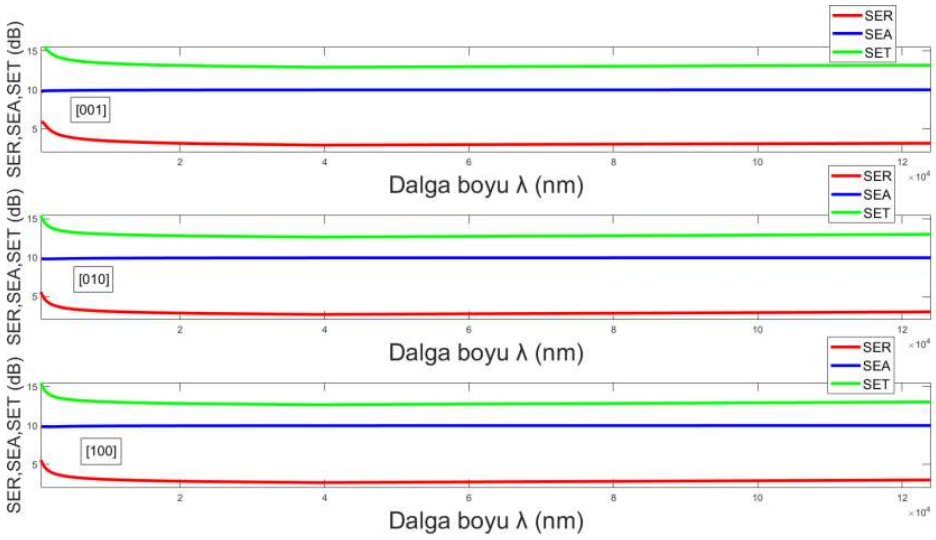
Şekil 7. FeB'nin ultraviyole bölgedeki kalkanlama etkinliliği

Şekil 8 görünür ışık bölgesinde (390-750 nm) yansıma (SER), soğurma (SEA) ve toplam (SET) kalkanlama etkisini göstermektedir.



Şekil 8. FeB'nin görünür ışık bölgesideki kalkanlama etkinliliği

Şekil 9 kızıl ötesi bölgede ki (750-106 nm) yansıma (SER), soğurma (SEA) ve toplam (SET) kalkanlama etkisini göstermektedir.



Şekil 9. FeB'nin kızıl ötesi bölgedeki kalkanlama etkinliliği

FeB'nin 28,551 nm ve 123980 nm arasında, ultraviyole, görünür ışık bölgesi ve kızıl ötesi bölgenin bir kısmında elektro manyetik dalgayı soğurma, yansıtma ve toplam kalkanlama etkililiğinin (radyasyonun geliş yönüne bağlı olarak) minimum ve maksimum değerleri dB olarak Tablo-1'de açıkça gösterilmiştir.

Tablo 1. FeB'nin 28-124000nm aralığındaki kalkanlama etkisi

	Dalga Boyu (nm)	**SEA (dB) 001**	**SEA (dB) 010**	**SEA(dB) 100**	**SER (dB) 001**	**SER (dB) 010**	**SER (dB) 100**	**SET (dB) 001**	**SET (dB) 010**	**SET (dB) 100**
UV Spektrum										
Başlangıç	28,551	7,4380	7,453	7,453	8,192	8,187	8,187	15,631	15,640	15,640
Bitiş	397,936	9,701	9,798	9,798	6,601	6,826	6,826	16,302	16,625	16,625
	Min SEA	**Max SEA**	**Min SER**	**Max SER**	**Min SET**	**Max SET**				
dB	**7,438** [001]	**11,146** [001]	**6,601** [001]	**9,697** [001]	**15,631** [001]	**20,404** [001]				
Görünür Bölge										
Başlangıç	392,464	9,698	9,793	9,793	6,608	6,828	6,828	16,306	16,621	16,621
Bitiş	746,635	9,7521	9,892	9,892	5,900	5,551	5,551	15,652	15,443	15,443
	Min SEA	**Max SEA**	**Min SER**	**Max SER**	**Min SET**	**Max SET**				
dB	**9,698** [001]	**9,9168** [100]	**5,551** [100]	**6,828** [100]	**15,443** [010]	**16,631** [100]				
IR Spektrum										
Başlangıç	756,530	9,754	9,890	9,890	5,895	5,523	5,523	15,650	15,413	15,413
Bitiş	123980	9,998	9,997	9,999	3,156	3,013	3,014	13,154	13,012	13,012

III. SONUÇLAR

Ferromanyetik özellik gösteren ortorombik kristal yapıdaki tek katmanlı FeB'un [001], [010], [100] doğrultulardan malzemeye nüfuz eden elektromanyetik dalganın (radyasyonun) elektromanyetik kalkanlama etkinliği ab-inito yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Tek katmanlı FeB en etkili toplam kalkanlama performansını (SET) aşırı ultraviyole (E-UV) bölgedeki 64,258 nm dalga boyunda, radyasyonun malzemeye dik geldiği [100] durumda (20,404dB) de sergilemiştir. Çoklu iç yansıma etkisi ihmal edilerek (SEM) bu performansın 10,767dB'li soğurma etkisinden (SEA) 9,673dB'li ise kırılma ektisinden (SER) meydana geldiği görülmüştür. Malzeme kalkanlama tepkisini 28 nm itibaren vermeye başlayarak 124000 nm ye kadar sürdürebilmiştir. Tek katmanlı atomik film tabakanın ultraviyole bölgede 15,632-20,404dB aralığında; görünür ışık bölgesinde 15,443-16,631dB aralığında ve kızıl ötesi bölgenin bir kısmında ise

12,661-15,650 dB aralığında toplam kalkanlama performansı sergilediği gözlemlenmiştir. İki boyutlu (2D) malzemenin marfolojik özellikleri göz önüne alınarak sergilemiş olduğu bu performans dikkate değerdir.

KAYNAKLAR

[1] Redlarski, G., Lewczuk, B., Żak, A., Koncicki, A., Krawczuk, M., Piechocki, J., ... & Gradolewski, D. (2015). The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes. BioMed research international, 2015.

[2] Ahlbom, A., & Feychting, M. (2003). Electromagnetic radiation: environmental pollution and health. British medical bulletin, 68(1), 157-165.

[3] Chhaya, L. (2012). EMR pollution-an imperceptible threat for safety. Available at SSRN 2165743.

[4] González, M., Pozuelo, J., & Baselga, J. (2018). Electromagnetic shielding materials in GHz range. The Chemical Record, 18(7-8), 1000-1009.

[5] Ott, H. W. (2011). Electromagnetic compatibility engineering. John Wiley & Sons.

[6] Banerjee, P., Bhattacharjee, Y., & Bose, S. (2020). Lightweight epoxy-based composites for EMI shielding applications. Journal of Electronic Materials, 49, 1702-1720.

[7] Iqbal, A., Sambyal, P., & Koo, C. M. (2020). 2D MXenes for electromagnetic shielding: a review. Advanced Functional Materials, 30(47), 2000883.

[8] [8] Geetha, S., Satheesh Kumar, K. K., Rao, C. R., Vijayan, M., & Trivedi, D. C. (2009). EMI shielding: Methods and materials—A review. Journal of applied polymer science, 112(4), 2073-2086.

[9] Kaşgöz, Alper (2017). Elektromanyetik Dalga Kalkanlama Özelliğine Sahip Polimer Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Yapıperformans İlişkilerinin İncelenmesi. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi. (478309)

[10] Altun, M., Karteri, İ., Güneş, M., & ALMA, M. H. (2017). Grafen katkılı odun-plastik nanokompozitlerinin elektromanyetik özellikleri ve elektromanyetik kalkanlama etkinliği karşılaştırmalı çalışması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(1), 38-47.

[11] Yüksek Lisans Tezi "Bazı Mxene Yapılarının Organik Moleküllerle Etkileşmesinin İncelenmesi" İlkay Özdemir Tez Tanışmanı: Prof. Dr. Ethem Aktürk Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı 2019 aydın (apaya göre düzenlenecek)

[12] Liu, H., Neal, A. T., Zhu, Z., Luo, Z., Xu, X., Tomanek D., Ye, P. D. 2014. Phosphorene: An Unexplored 2D Semiconductor with a High Hole Mobility. ACS Nano, 8: 4033-4041

[13] Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2017). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. Nature Reviews Materials, 2(2). https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.98

[14] Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2012). Two-dimensional transition metal carbides. ACS nano, 6(2), 1322–1331. https://doi.org/10.1021/nn204153h

[15] Zhang, T., Zhang, B., Peng, Q., Zhou, J., & Sun, Z. (2021). Mo 2 B 2 MBene-supported single-atom catalysts as bifunctional HER/OER and OER/ORR electrocatalysts. Journal of Materials Chemistry A, 9(1), 433-441.

[16] Jiang, Z., Wang, P., Jiang, X., & Zhao, J. (2018). MBene (MnB): a new type of 2D metallic ferromagnet with high Curie temperature. Nanoscale horizons, 3(3), 335-341.

[17] Mizokawa, T. (2004). Orbital polarization in layered t2g electron systems. New Journal of Physics, 6(1), 169.

[18] Lee, J. G. (2016). Computational materials science: an introduction. CRC press.

[19] M. Fox, "Optical Properties of Solids. Oxford Master Series in Condensed Matter Physics," Oxford University Press, Oxford, 2001.

[20] Shukla, V. (2019). Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. Nanoscale Advances, 1(5), 1640-1671.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

High Resolution In-Shoe Plantar Pressure Measurement System: Smart Insoles

Fatih Mert Çelebi[a], Sabri Uzuner[b], Engin Nas[c]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[c]Düzce Üniversitesi, , Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Corresponding author:** fatihcelebi.dgh@duzce.edu.tr

ABSTRACT

Certain orthopedic conditions affecting the foot and knee can alter plantar pressure distribution. Accurate measurement of plantar pressure necessitates consideration of the diverse contours formed by the foot's sole during everyday movements. Consequently, researchers have devised in-shoe plantar pressure measurement systems to address this need. However, these systems only measure pressure at 3-10 points, resulting in low resolution of the results. This study has developed an intelligent insole that does not require expert control and can be used as an in-shoe system. The developed insole provides high resolution pressure measurement from 421 points. When compared with similar studies in the literature on the basis of resolution, measurement speed and cost parameters, the developed system is found to be in an advantageous position. This study provides a high resolution solution in the field of in-shoe plantar pressure measurement and can be recommended as an important resource for biomedical research.

Keywords: *Deformity, In Shoe System, Insoles, Plantar Pressure, Velostat.*

Yüksek Çözünürlüklü Ayakkabı içi Plantar Basınç Ölçüm Sistemi: Akıllı Tabanlık

ÖZET

Ayak ve dizde oluşan bazı ortopedik rahatsızlıklar plantar basınca etki etmektedir. Plantar basıncın doğru ölçümü, günlük hareketler sırasında ayak tabanının oluşturduğu çeşitli konturların dikkate alınmasını gerektirir. Sonuç olarak araştırmacılar bu ihtiyacı karşılamak için ayakkabı içi plantar basınç ölçüm sistemleri geliştirdiler. Ancak bu sistemler basıncı yalnızca 3-10 noktada ölçmektedir ve bu da sonuçların çözünürlüğünün düşük olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada uzman kontrolü gerektirmeyen ve ayakkabı içi sistem olarak kullanılabilecek akıllı bir iç taban geliştirildi. Geliştirilen iç taban 421 noktadan yüksek çözünürlüklü basınç ölçümü sağlar. Çözünürlük, ölçüm hızı ve maliyet parametreleri bazında literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında geliştirilen sistemin avantajlı konumda olduğu görülmektedir. Bu çalışma ayakkabı içi plantar basınç ölçümü alanında yüksek çözünürlüklü bir çözüm sunmakta olup biyomedikal araştırmalar için önemli bir kaynak olarak önerilebilir..

Anahtar Kelimeler: *Ayak İçi Sistem, Deformite, Plantar Basınç, Tabanlık, Velostat.*

I. INTRODUCTION

Foot and knee health is a critical health issue affecting individuals' quality of life [1-3]. Plantar pressure distribution represents the pressure distribution of the sole of the foot [4]. For this reason, an orthopedic disorder that may occur in knee, ankle, or foot mechanics can directly affect the plantar pressure distribution, and this difference in pressure distribution can be one of the indicators that can be used to evaluate human quality of life [5]. These orthopedic disorders, Angular Deformity [6, 7], Osteoarthritis [8], Plantar Fasciitis [9], Pes Planus [10], and Pes Cavus [9] can be given as examples.

The diagnostic process of posture disorders aims to comprehensively evaluate the patient's condition and reach a specific diagnosis [11-13]. However, expert control is needed before these methods can be used widely. The specialist check-up is based on clinical skills such as assessing the patient's symptoms, reviewing the medical history, and performing a physical examination. The specialist physician aims to diagnose accurately by considering factors such as the patient's lifestyle, genetic factors, activity level and

other health problems. However, this process can sometimes take time [14], and advanced imaging technologies may be needed to understand the conditions of various disorders more clearly. Although devices such as MRI and CT accelerate this diagnostic process, a specialist's evaluation of these images prolongs the process. In addition, although medical imaging is a quick solution for diagnosis, it cannot detect the loads caused by posture disorders.

In the literature, it has been observed that basically two different methods are used to measure plantar pressure distribution [15]. The first method is platform-based high-precision pedopowergraph [16], pedobarography [17], pedobarogram [18], EMED-400 plantar pressure system [19], etc., which require expert control. However, using these devices is often costly, leading to inequalities in healthcare access [20, 21]. The second method is in-shoe systems, which are more cost-effective and do not require specialists [22]. These systems have lower measurement accuracy than platform-based systems [23, 24]. In-shoe systems generally target the four main parts of the sole of the foot: anterior, posterior, lateral and medial [25]. In these systems, four different types of sensors are generally used: capacitive [26], resistive [27], piezoelectric [28], and piezoresistive [23]. In studies conducted to measure in-shoe plantar pressure, the number of sensors placed on the sole of the foot varies between 3-9 [29-32]. The small number of sensors reduces the measurement areas and resolution of the sole of the foot.

This study proposes a low-cost, user-friendly smart insole for in-shoe use, requiring no expert control. The intelligent insoles are designed to be easily utilized, with a slim profile of 0.6 mm for comfortable daily wear. This innovation aims to offer high-resolution pressure measurements from 421 points.

II. Material and Method

The materials used in the system implemented in this study consist of two parts. The first part is the insole, which consists of acetate, copper tape, and velostat strips. The second part is the electronic card part, which allows the reading and processing of data from the insoles.

A. Design

The insoles consist of 2 layers, upper and lower. While voltage distribution is made from the lower layer, analog data is read from the upper layer. These voltage and analog data transmissions are provided using copper tapes.

The aim is to design the insoles with a thin and flexible structure for ease of use. For this reason, copper bands and velostat are fixed on nylon and acetate. In this way, it is thought that it will not cause any discomfort during use and will also eliminate the risk of product deformation thanks to its flexible structure.

Acetate Cutting

The system design process started with acetate cutting. The acetate is cut in the shape of the foot sole to hold the insole design together without causing visual pollution. The foot sole drawing transferred to acetate was drawn according to foot size 44. Basically, the entire structure is built on this acetate. Acetate was cut into 2 pieces (bottom and top layer) by the dimensions in Figure 1.

Copper Tape Array

Copper tapes were glued onto the acetate in parallel, leaving a 2 mm gap between them. The purpose of leaving a gap is to prevent any short circuit in stretching. In addition, copper bands are arranged horizontally on the lower surface and vertically on the upper surface. In this way, the intersection points have been increased. Its symbolic representation is shown in Figure 2a, the upper surface in Figure 1a, and the lower surface in Figure 1b.



a) Copper Tape Top Surface Array



b) Copper Tape Bottom Surface Array



c) Top Surface Arrangement of Velostat Strips



d) Bottom Surface Arrangement of Velostat Strips

Figure 1. Arranging Velostat and Copper Tape Strips into Layers

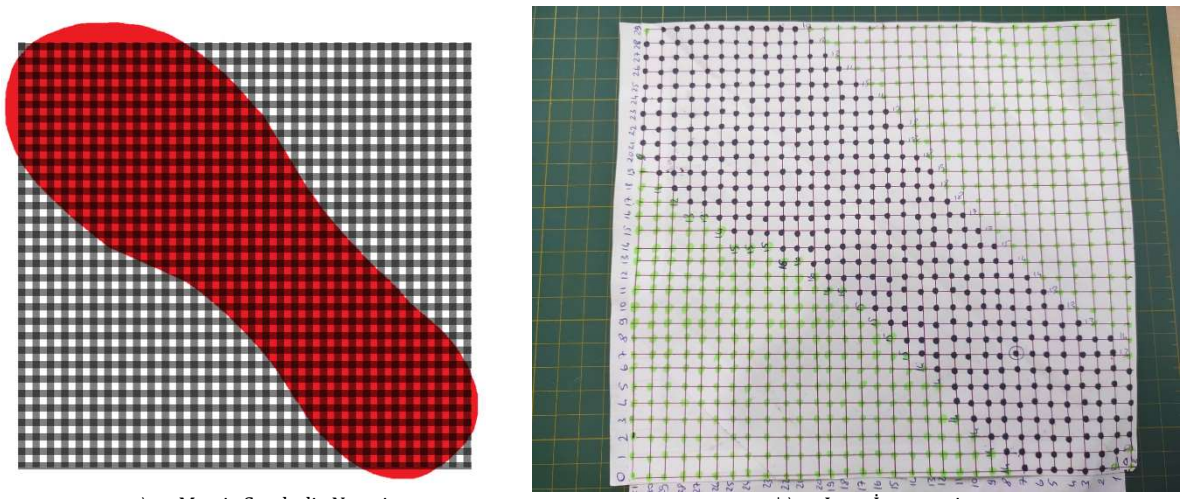
Velostat Nylon Array

Since Velostat nylons were supplied in standard sizes of 28x28 cm, they were cut to obtain 5mm thick strips. The resulting velostat nylon strips were glued onto the copper tapes on both the lower and upper surfaces. For the Velostat strips to adhere to the surface, 1 mm wide double-sided tape was added to the gaps left between the copper tapes.

Figure 1c shows the upper surface arrangement of velostat nylons, and Figure 1d shows the lower surface arrangement.

Determining Intersection Points

A total of 32 strips were obtained on the upper surface and 30 strips on the lower surface. The matrix formed by the intersection of these strips is 32x30 in size; that is, it has the capacity to accommodate 960 elements, but the matrix form was preferred for ease of data processing. For this reason, the matrix elements used in the system are the elements at the intersection of the sole of the foot. It is shown symbolically in Figure 2a.



a) Matrix Symbolic Notation b) Lane İntersections

Figure 2. Intersection Points

Intersections outside the foot sole shape are not taken into account. In the software part, the values are determined as "0".

A different intersection representation is examined in Figure 2b. Dark blue dots represent the elements to be processed, and green dots represent the elements to be defined as "0". There are 421 intersection points, each representing an independent pressure sensor.

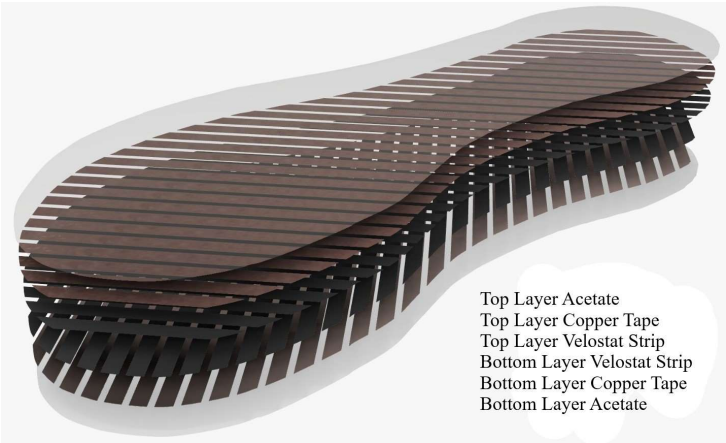


Figure 3. Detailed Insole Model

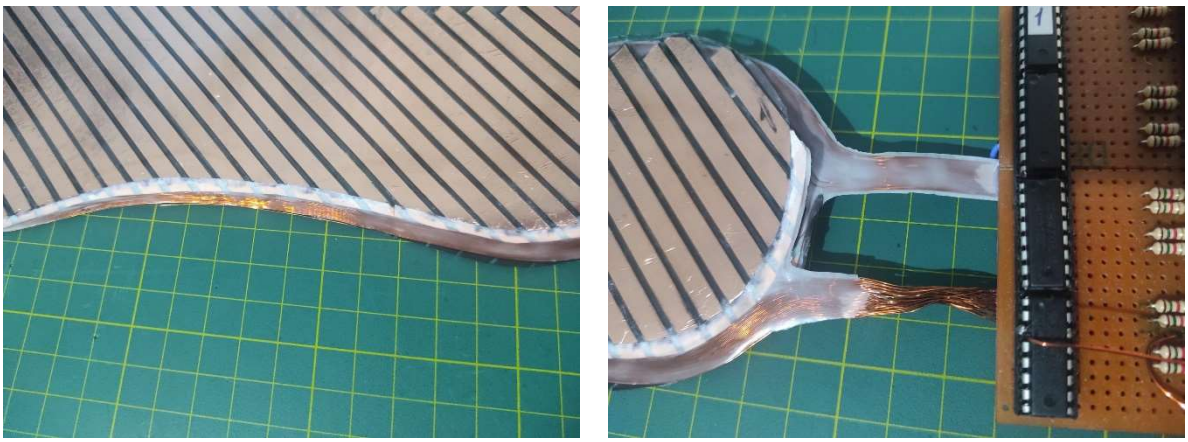
Figure 3 shows the detailed model design of the insole from the Fusion 360 program for a clear understanding of the insole design.

B. Electronic

CD4051 integrated circuit was used to read analog data using fewer pins. All read analog data is processed into matrix cells representing each pressure point. The simplified circuit diagram was designed with the Fritzing program.

Enameled Copper Wire Connection

A 0.2 mm thick enamel-coated copper wire is soldered to each of the copper tape strips in the upper and lower layers. As seen in Figure 4a, the soldered enameled copper wires are arranged side by side to form a thin layer. Then, both the solder joints and the enamel-coated copper wires are coated with UV-sensitive white resin to prevent dispersion and disconnection.



a) Enameled Copper Wire Array b) Transferring the Connections to the Circuit

Figure 4. Enameled Copper Wire Connections

After this process was applied to the upper and lower layers, all enamel-coated copper wires were transferred to the electronic circuit, as seen in Figure 4b. To avoid connection confusion, the connections of the lower and upper layers are transferred as two different paths.

In this way, while the connections are being transmitted, the high conductivity feature is preserved, and all connections are provided without any change in the thickness of the insole.

Circuit Diagram

The circuit diagram has been simplified and designed to avoid cable confusion. Detailed connection is given in the table. The ICs are listed in Figure 5, with number 1 on the left and number 8 on the right. Resistors were used in the first four integrated circuits but not in the following ones. This is because the first four integrated parts are connected to the upper layer of the insole. The upper layer is used for analog operation and the lower layer is used for digital operation. The resistors of the integrated circuits connected to the upper layer represent the simple voltage divider circuit. In order to avoid confusion, the integrated notches are arranged on the left side.

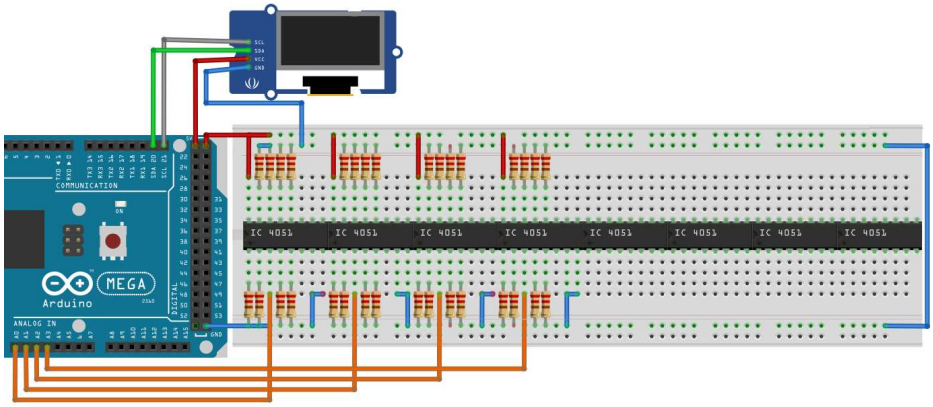


Figure 5. Circuit Diagram

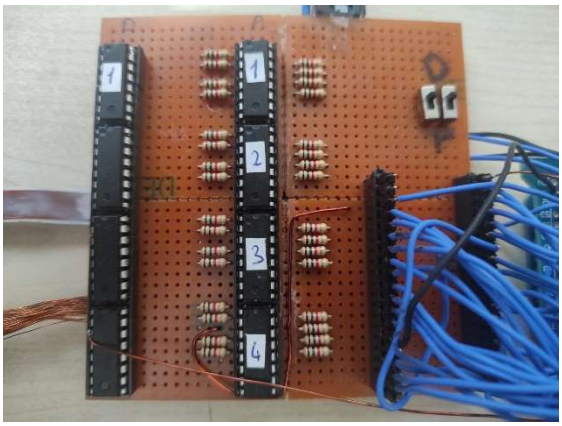
In Table 1, integrated circuits are abbreviated as "E" and numbered. The velostat strips (30 pieces) on the bottom layer of the insole are abbreviated as "IB", and the velostat strips (32 pieces) on the top layer are abbreviated as "IT". Additionally, Arduino Mega is abbreviated as “AR” and numbered using these abbreviations. In the information sheet of the CD4051 integrated circuit, the pin outputs are as follows; 1-CHANNEL I/O4, 2- CHANNEL I/O6, 3-COM OUT/IN, 4- CHANNEL I/O7, 5- CHANNEL I/O5, 6- INHIBIT, 7-VEE, 8-VSS, 9-C , 10-B, 11-A, 12- CHANNEL I/O3, 13- CHANNEL I/O0, 14- CHANNEL I/O1, 15- CHANNEL I/O2, 16-VDD. VDD and VSS pins represent the power line[33].

Table 1. Arduino Mega and Base Connection List of Circuit Board

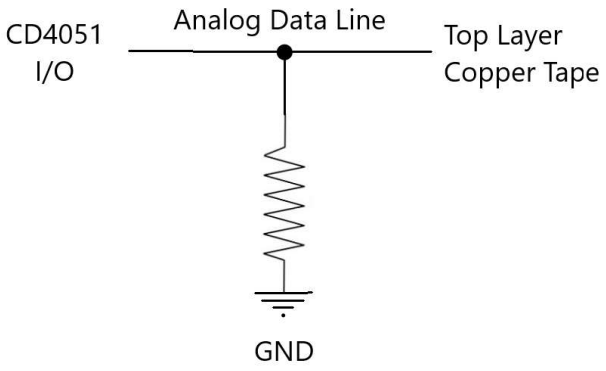
Pin Adı	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Inhibit	AR34	AR35	AR36	AR37	AR53	AR52	AR51	AR50
Input A	AR22	AR25	AR28	AR31	AR38	AR41	AR44	AR47
Input B	AR23	AR26	AR29	AR32	AR39	AR42	AR45	AR48
Input C	AR24	AR27	AR30	AR33	AR40	AR43	AR46	AR49
I/O 0	IT1	IT9	IT17	IT25	IB1	IB9	IB17	IB25
I/O 1	IT2	IT10	IT18	IT26	IB2	IB10	IB18	IB26
I/O 2	IT3	IT11	IT19	IT27	IB3	IB11	IB19	IB27
I/O 3	IT4	IT12	IT20	IT28	IB4	IB12	IB20	IB28
I/O 4	IT5	IT13	IT21	IT29	IB5	IB13	IB21	IB29
I/O 5	IT6	IT14	IT22	IT30	IB6	IB14	IB22	IB30
I/O 6	IT7	IT15	IT23	IT31	IB7	IB15	IB23	-
I/O 7	IT8	IT16	IT24	IT32	IB8	IB16	IB24	-

Soldering the Electronic Circuit Board

10x10 cm perforated pertinax held the CD4051 integrated circuits, resistors and connection cables together. In Figure 6a, the 4 CD4051 integrated circuits on the right side are connected to the upper layer of the base. For this reason, all resistors are connected to the four integrated circuits on the right to act as a voltage divider circuit. The integrated circuits on the left are connected to the bottom layer, and since they are used for digital operations, no resistors are needed.



a) Electronic circuit



b) Symbolic Voltage Divider Circuit

Figure 6. Resistance Connections

Each resistor is connected to the upper layer of copper strips (32 pieces). In order to understand the voltage divider phase more clearly, Figure 6b shows a symbolic drawing of a single intersection point. Velostat Nylon also has a resistance on it. Different voltage values are obtained thanks to the fixed resistance on the circuit and the variable resistance within the velostat.

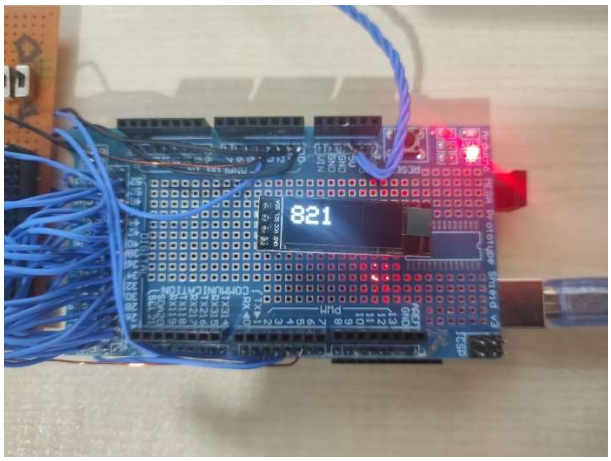


Figure 7. Arduino Connection

The integrated circuits connected to the electronic circuit's upper layer allow 32 analog data to be read from 4 pins. All control and analog pins are transmitted to Arduino Mega with a single-core assembly cable, as seen in Figure 7.

C. Software

The system software is included in Arduino Mega and is written with the Arduino IDE program. This program can be used to program all Arduino models and similar development boards containing simple microcontrollers.

Reading Data

Data reading in the system is done analogously. Thanks to Arduino Mega, 10-bit (210=1024) analog reading can be made. This reading sensitivity provides an advantage when measuring the plantar pressure distribution of individuals of higher weight or very light. Analog Reading is done from the upper insole. There are 32 strips in total on the upper insole, and each strip is connected to the CD4051 integrated circuits in 8 ways. In this way, all readings can be made from 4 analog pins. While any strip on the upper layer is being read, all strips on the lower layer (32 pieces) are powered and cut off sequentially. In this way, 30 operations were performed when reading a single strip in the upper layer, and 960 operations in total are performed when reading all strips in the upper layer. To avoid data confusion during this reading process, a waiting time of 500 us was added between each operation. In this way, all data was read in approximately 480 ms (0.48 s) without data interference. All read analog data is recorded in a 32x30 matrix.

Data Processing

All data of the 32x30 matrix was looped and listed on the serial monitor of the Arduino IDE program. Data was added to the variable called total pressure in each printing process. The total data is shown on the OLED screen, as shown in Figure 7. In this way, while all data is shown separately on the serial monitor of the Arduino IDE program, it is shown as a whole on the OLED screen.

Data Visualization

The read data is shown on the serial monitor of the Arduino IDE program as seen in Figure 8.

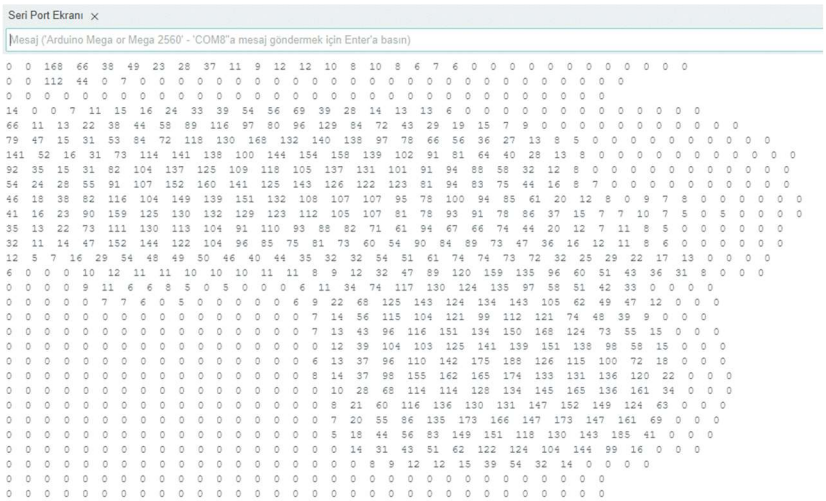


Figure 8. Serial Monitor Display

Simultaneously, total pressure data is shown on the OLED screen in Figure 7.

All data (960 pieces) displayed on the serial monitor of the Arduino IDE program were transferred to the Microsoft Excel program, each in a different cell, creating a matrix of 32x30 size. For a clearer visual understanding of the data in the Microsoft Excel program, the 0-50-200 values were colored blue-yellow-red by using the conditional formatting tool.

III. Conclusion and Discussion

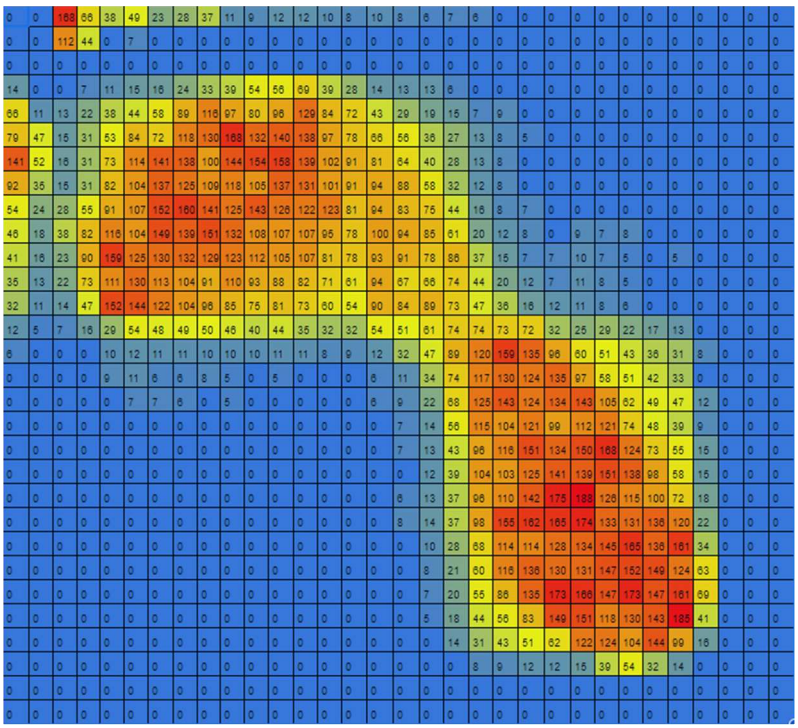


Figure 9. Coloring Data with Conditional Formatting

In Figure 9, all analog data read from the upper base is processed and colored. These plantar pressure values belong to a male individual who weighs 100kg, is 185cm tall, is 28 years old, and has a foot size of 43.

As a result of the study, plantar pressure measurement was achieved from 421 points using velostat nylon. When the measured values were examined, it was observed that the centers of the metatarsal and

tarsal regions on the sole of the foot were under high pressure. At the same time, these pressure values decrease with distance from the center.

In the literature review, plantar pressure measurement was achieved using two different methods: pressure platform and in-shoe systems [34]. Compared to studies in the literature, the results obtained in this study provide different advantages depending on the area of use.

In 2012, Razak et al. In the study conducted by A.Ş., the advantages and disadvantages of platform-based and in-shoe pressure measurement systems were compared. The study mentioned that platform-based devices are limited to the laboratory, and the resolution of intrafoot pressure meters is low due to the number of sensors [15].

In studies conducted on the in-shoe plantar pressure system, pressure points were generally kept low due to lack of space. For this reason, the resolution of the post-measurement values is quite low. These measurements are compared in Table 2 in terms of measurement resolution, measurement speed, and price parameters. The resolution of this study is lower than that of the platform-based pressure measurement studies in the literature. However, if we compare the area covered by the device, we will see that the prototype made in this study is 44 feet in size and thin in structure. Therefore, it can be used to measure in-shoe pressure.

Table 2. Comparison of Studies in the Literature

Authors	Measurement Resolution	Measurement Speed (ms-Hz)	Approximate Cost ($)
This Study	421 Point	480-2	25
Shu et al. [32]	6 Point	10-100	15
Saito et al. [35]	7 Point	1100-1	45
Praet and Louwerens[36]	9 Point	2-500	-
Chen et al.[37]	8 Point	20-50	37
Bamberg et al.[31]	5 Point	15-75	30
Pappas et al.[38]	3 Point	10-100	90
Healy et al.[30]	8 Point	10-100	40

When compared to studies in the literature, it has been observed that this study has a high resolution among in-shoe pressure measurement systems. Based on the measurement speed, it has a slower processing speed than many studies in the literature. The reason for this is the individual reading time of each sensor. When a cost-based comparison is made, a more cost-effective prototype has been developed compared to the majority of studies in the literature. When all variables are considered, it has been observed that the performance of the system implemented in this study is higher. No study on higher sensitivity in-shoe plantar pressure measurement was found in the reviewed literature. For this reason, the study can be recommended for biomedical studies, considering its high sensitivity and compact structure regarding in-shoe plantar pressure measurement.

REFERENCES

[1] D. Karaman, K. Dilek, and N. Y. Atar, "Evde sağlık hizmeti verilen bireylerin hastalık durumlarının ve bakım ihtiyaçlarının değerlendirilmesi: Zonguldak örneği", *Gümüşhane University Journal of Health Sciences*, vol. 4, issue 3, p. 347-359, 2015.

[2] B. Anafaroğlu, "Halluks valgus deformitesinin yaşam kalitesi üzerine etkisi", *Ankara Health Services Journal,* vol. 11, issue 1, p. 9-15, 2012.

[3] T. Karataş, E. Yılmaz, and Ü. Polat, "Osteoartrit Yönetimi, Yaşam Kalitesi ve Hemşirenin Destekleyici Rolü", *SDU Faculty of Medicine Journal*, vol. 29, issue 2, p. 265-271, 2022.

[4] T. Çankaya, "İlköğretim çağındaki çocuklarda ayak, ayak bileği deformitelerinin podoskop ile değerlendirilmesi", master's thesis, Bolu Abant İzzet Baysal University, Institute of Health Sciences, Bolu, Türkiye, 2004.

[5] Y. F. Shih, C. Y. Chen, W. Y. Chen, and H. C. Lin, "Lower extremity kinematics in children with and without flexible flatfoot: a comparative study", *BMC musculoskeletal disorders*, vol. 13, issue, p. 1-9, 2012.

[6] H. K. Sürmen, M. C. Fetvacı, I. Danışman, and Y. Z. Arslan, "Spina Bifida Hastalığı Olan Çocuklar İçin Ayak-Ayak Bileği Ortezi Tasarımı", doctoral thesis, Istanbul University Institute of Science and Technology, İstanbul, Türkiye, July 2016.

[7] Y. Güzel, "Diz Ağrılı Hastaya Yaklaşım", *Clinical Medicine Family Medicine*, vol. 9, issue 1, p. 27-32, 2017.

[8] H. Kaya, "Diz osteoartrit tanılı bireylerde denge ve plantar basıncın değerlendirilmesi", master's thesis, Istanbul Medipol University Institute of Health Sciences, İstanbul, Türkiye, 2020.

[9] C. Turan, "Karbon tabanlık kullanımının farklı ayak deformitelerindeki ayak plantar basınç dağılımına etkisi", master's thesis, Istanbul Medipol University Institute of Health Sciences, İstanbul, Türkiye, 2021.

[10] A. Selin and S. Çolak, "Üniversite öğrencilerinde ayak medial longitudinal ark durumunun denge ve esneklikle ilişkisi", *Acıbadem University Journal of Health Sciences*, vol. 11, issue 4, p. 625-630, 2020.
[11] B. Nemeth, "The diagnosis and management of common childhood orthopedic disorders", *Current problems in pediatric and adolescent health care*, vol. 41, issue 1, p. 2-28, 2011.
[12] E. J. Strandberg, T. Mozaffar and R. Gupta, "The role of neurodiagnostic studies in nerve injuries and other orthopedic disorders", *The Journal of hand surgery*, vol. 32, issue 8, p. 1280-1290, 2007.
[13] J. Hickman and C. Peters, "Hip pain in the young adult: diagnosis and treatment of disorders of the acetabular labrum and acetabular dysplasia", *American Journal of Orthopedics (Belle Mead, NJ)*, vol. 30, issue 6, p. 459-467, 2001.
[14] M. Morgenstern, R. Kühl, H. Eckardt, Y. Acklin, B. Stanic, M. Garcia, D. Baumhoer and W.J. Metsemakers, "Diagnostic challenges and future perspectives in fracture-related infection", *Injury*, vol. 49, issue, p. S83-S90, 2018.
[15] A. H. A. Razak, A. Zayegh, R.K. Begg, and Y. Wahab, "Foot plantar pressure measurement system: A review", *Sensors*, vol. 12, issue 7, p. 9884-9912, 2012.
[16] R. Periyasamy and S. Anand, "The effect of foot arch on plantar pressure distribution during standing", *Journal of medical engineering & technology*, vol. 37, issue 5, p. 342-347, 2013.
[17] S. Özyürek, İ. Demirbüken, Ö. Ç. Tosun, R. E. Okyay and S. Angın, "Gebelik sürecinde zaman mesafe parametreleri ve plantar basınç dağılımı", *Fizyoterapi Rehabilitasyon*, vol. 24, issue 1, p. 71-79, 2013.
[18] M.Lord, "Foot pressure measurement: a review of methodology", *Journal of biomedical engineering*, vol. 3, issue 2, p. 91-99, 1981.
[19] A. K. Buldt, S. Forghany, K. B. Landorf, P. Levinger, G. S. Murley and H. B. Menz, "Foot posture is associated with plantar pressure during gait: A comparison of normal, planus and cavus feet", *Gait & posture*, c. 62, sayı, ss. 235-240, 2018.
[20] C. Sungur, "Tıbbi Görüntüleme Hizmetlerinin Gereksiz Kullanımı ve Buna Karşı Çözüm Önerileri", *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Faculty of Economics and Administrative Sciences Journal*, vol. 8, issue 1, p. 67-86, 2018.
[21] F. Duygulu, S. Mıstık, H. Şahan and A. Öztürk, "Aile Hekimliği Uzmanlık Eğitiminde Ortopedi ve Travmatoloji: Teşhis ve Tedavide Bilinmesi ve Uygulanması Gerekenler", *Tıp Eğitimi Dünyası*, vol. 18, issue 18, p. 27-31, 2005.
[22] R. Ferber, T. Webber, B. Everett and M. Groenland, "Validation of plantar pressure measurements for a novel in-shoe plantar sensory replacement unit", *Journal of diabetes science and technology*, vol. 7, issue 5, p. 1167-1175, 2013.
[23] A. Gefen, "Pressure-sensing devices for assessment of soft tissue loading under bony prominences: technological concepts and clinical utilization", *Wounds: a compendium of clinical research and practice*, vol. 19, issue 12, p. 350-362, 2007.
[24] B. MacWilliams and P. Armstrong, "Clinical applications of plantar pressure measurement in pediatric orthopedics", *Pediatric gait: a new millennium in clinical care and motion analysis technology*, p. 143-150, 2000.
[25] Y. Cong and M. Zhang. "Measurement of in-shoe plantar triaxial stresses in high-heeled shoes", *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, p. 1760-1763, 2010.
[26] S. Urry, "Plantar pressure-measurement sensors", *Measurement science and technology*, vol. 10, issue 1, p. R16, 1999.
[27] W. Putnam and R. B. Knapp, "Input/data acquisition system design for human computer interfacing", *Unpublished Lecture Notes*, October, vol. 17, sayı, 1996.
[28] X. Li, K. Wang, Y.L. Wang and K. C. Wang, "Plantar pressure measurement system based on piezoelectric sensor: a review", *Sensor Review*, vol. 42, issue 2, p. 241-249, 2022.
[29] Y. Feng, Y. Ge and Q. Song. "A human identification method based on dynamic plantar pressure distribution", *2011 IEEE International Conference on Information and Automation*, p. 329-332, 2011.
[30] A. Healy, P. Burgess-Walker, R. Naemi and N. Chockalingam, "Repeatability of WalkinSense® in shoe pressure measurement system: A preliminary study", *The Foot*, vol. 22, issue 1, p. 35-39, 2012.
[31] S. J. M. Bamberg, A. Y. Benbasat, D. M. Scarborough, D. E. Krebs and J. A. Paradiso, "Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system", *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, vol. 12, issue 4, p. 413-423, 2008.
[32] L. Shu, T. Hua, Y. Wang, Q. Li, D. D. Feng and X. Tao, "In-shoe plantar pressure measurement and analysis system based on fabric pressure sensing array", *IEEE Transactions on information technology in biomedicine*, vol. 14, issue 3, p. 767-775, 2010.
[33] W. Liu, M. Zhang and X. Zhou, "The implement of multichannel and adjustable gain A/D sampling system", *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, p. 1819-1822, 2011.
[34] D. Rosenbaum and H. P. Becker, "Plantar pressure distribution measurements. Technical background and clinical applications", *Foot and ankle surgery*, vol. 3, issue 1, p. 1-14, 1997.
[35] W. Liu, M. Zhang and X. Zhou, "The implement of multichannel and adjustable gain A/D sampling system daily human activity", *Medical engineering & physics*, vol. 33, issue 5, p. 638-645, 2011.
[36] S. F. Praet and J. W. K. Louwerens, "The influence of shoe design on plantar pressures in neuropathic feet", *Diabetes care*, vol. 26, issue 2, p. 441-445, 2003.
[37] M. Chen, B. Huang, K. K. Lee and Y. Xu. "An intelligent shoe-integrated system for plantar pressure measurement", *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, p. 416-421, 2006.
[38] I. P. Pappas, T. Keller, S. Mangold, M. R. Popovic, V. Dietz and M. Morari, "A reliable gyroscope-based gait-phase detection sensor embedded in a shoe insole", *IEEE sensors journal*, vol. 4, issue 2, p. 268-274, 2004.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Otomotiv Yan Sanayiinde Tedarik Zinciri Yönetimi Ulaştırma Modeli Optimizasyonu Araç Rotalama Problemi

Aybüke KUMAŞ[a,], Âli Yurdun ORBAK[b]*

Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa/Türkiye.
[b] Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye.
[*] **Sorumlu Yazar:** 502106003@ogr.uludag.edu.tr

ÖZET

Tedarik zinciri yönetimi, ürün veya hizmetlerin hammaddeden başlayarak son müşteriye ulaşıncaya kadar ki geçen süreçte yer alan operasyonların, bilgi akışının ve fiziksel dağıtımın tümünü kapayan bir sistemdir. Bu dinamik yapı bilgi, ürün ve diğer tüm aşamalar arasında etkileşim halindedir. Günümüz gelişen dünyasında ve ilerleyen teknoloji ile birlikte tedarik zinciri düşük maliyetli ve fayda sağlayan bir strateji olarak görülmektedir. Araç rotalama problemleri; bir depo ya da merkezden belirli dağıtım noktalarına belirli bir kapasiteye sahip araçlar ile en kısa mesafeyi izleyerek hizmet vermeyi amaçlayan problemlerdir. Bu çalışmada bir otomotiv fabrikasının taleplerini karşılayabilmek amacıyla tedarik zinciri ağının maksimum verim ile en az maliyetli araç rotalarının belirlendiği bir araç rotalama problemi ele alınmıştır. Ele alınan araç rotalama problemi klasik çözüm yöntemleri ve gelişmiş yöntemler ile çözülerek en az maliyetli olan optimum rotalar elde edilmiştir. Çalışma sonucu elde edilen tüm sonuçlar gerçek veriler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Tedarik zinciri yönetimi, otomotiv, optimizasyon, ulaştırma modeli, araç rotalama.*

Supply Chain Management Transportation Model Optimization in Automotive Supply Industry Vehicle Routing Problem

ABSTRACT

Supply chain management is a system that covers all operations, information flow and physical distribution of products or services, starting from raw materials until they reach the end customer. This dynamic structure interacts between information, product and all other stages. In today's developing world and with advancing technology, supply chain is seen as a low-cost and beneficial strategy. Vehicle routing problems are problems that aim to provide service by following the shortest distance from a warehouse or center to certain distribution points with vehicles of a certain capacity. In this study, a vehicle routing problem in which the maximum efficiency and least cost vehicle routes of the supply chain network are determined in order to meet the demands of an automotive factory is discussed. By solving the vehicle routing problem with classical solution methods and advanced methods, optimum routes with the least cost have been obtained. All results obtained from the study were interpreted by comparing them with real data.

Keywords: *Supply Chain management, automotive, optimization, transportation model, vehicle routing.*

I. GİRİŞ

Otomotiv sektörü 20.yüzyıl itibari ile dünyada önemli bir yankı uyandırmış ve en önemli sektörlerden biri haline gelmiştir. Gelişen ve nüfusu giderek artan dünyada hayatımızın çok önemli bir parçası haline gelen otomotiv sanayi her geçen gün büyüyerek gelişmektedir. Otomotiv sanayi günümüzde yarattığı katma değer ile birçok sektörün gelişmesini doğrudan etkilemiştir. Günümüz dünyasında yer alan rekabet koşullarında şirketler varlıklarını devam ettirebilmek amacıyla müşteri tatminini ileri seviyeye çıkartabilmek için ürün performansının yanı sıra maliyetleri düşürmenin de büyük önem teşkil ettiğini

kavramışlardır. Şirketlerin rekabet ortamında varlıklarını devam ettirebilmek için Tedarik Zinciri Yönetimi uygulamaları büyük önem taşımaktadır.

Tedarik zinciri, hammaddenin temin edilmesi ile başlayan ve ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar geçen sürece ait tüm faaliyetlerin oluşturduğu bir ağdır. Tedarik zinciri aynı zamanda bir şirketin tedariğini sağlayan şirketlerin meydana getirdiği bir ağ olarak tanımlanmaktadır. Tedarik Zinciri Yönetimi tedarikçiler ile başlayan ve müşterilerle sonlanan bir zinciri oluşturmaktadır. Bu zincirde oluşabilecek herhangi bir kopukluk tüm sistemi etkileyebileceğinden dolayı sistemin iyi bir şekilde yönetimi oldukça önemlidir.

Mal ve hizmetlerin tedarik aşamasından, üretimine ve nihai tüketiciye ulaşmasına kadar birbirini izleyen tüm halkaları kapsayan Tedarik Zinciri, iş süreçleri açısından bakıldığında satış süreci, üretim, envanter yönetimi, malzeme temini, tedarik ve müşteri hizmetleri gibi birçok alanı içine almaktadır. Dolayısıyla etkin ve verimli bir lojistik hizmetini en düşük lojistik maliyeti ile sağlamak en önemli önceliktir. (Tanyaş M. , 2020).

Günümüz dünyasında var olan rekabet ortamı; tedarik zinciri işletmelerini, kapasite dağıtım stratejilerini yeniden gözden geçirmeye teşvik etmektedir. Tedarik zinciri yönetiminde dağıtım fonksiyonu, işletmeler için oldukça önemli bir fonksiyon olup, stratejik anlamda önem teşkil etmektedir. Bu anlamda dağıtım ağlarının en etkin şekilde kullanımı şirketler için oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Tedarik zinciri ağları için optimizasyon yöntemleri kullanılarak dağıtım ağlarının etkinliği en üst seviyede tutulmaya çalışılmaktadır.

Tedarik zinciri dinamik bir yapı özelliği taşıyarak bilgi, ürün ve malzemelerin akışı konularını içermektedir. Tedarik zinciri sürecinin oluşturulmasının temel amacı, müşteri ihtiyaçlarını karşılarken şirketin karını maksimum seviyede tutabilmektir.

Tedarik zincirinin etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesi işletmeler açısında büyük bir öneme sahiptir. Organizasyonlar ilk etapta tedarik zincirini ağını kurduklarında tüm alternatiflerden haberdar değildirler, bundan dolayı birçok tedarik zinciri optimum düzeyde değildir. Optimum tedarik zincirine ulaşma arayışı ve yapısal çeşitlilikler fayda sağlamaktadır.

Tedarik zincirinin amacı ürün ve hizmetlerin en efektif olarak gerekli yerlere ulaştırılmasının sağlanmasıdır. Dağıtım sisteminin amacı ise tedarik noktasından alınan ürün ve hizmetlerin işletmeye getirilmesini sağlamaktır. Artan rekabet ortamından ötürü günümüz işletmeleri için dağıtım planlamasına büyük ölçüde önem vermektedirler. Dağıtım sisteminin etkinliği, tedarik zinciri ağının iyi yönetilmesindeki temel faktörlerden biridir. Maliyet avantajı sağlamak amacı ile işletmeler kazanç elde edebilmek için dağıtım planlaması yapmaktadırlar. Etkin bir dağıtım stratejisi ve planlaması sayesinde dağıtım kanallarından optimum düzeyde yararlanılabilmektedir. Bu şekilde, kaynakların etkin ve verimli kullanılabilmesi sağlanılarak maliyet avantajı sağlanabilmektedir. Böylece işletmelerin rekabet ortamında kabiliyeti ön plana çıkmaktadır.

Etkili bir dağıtım sistemi kurgulamak için efektif bir konum planlaması ile dağıtım kanallarından optimum düzeyde fayda sağlanabilmektedir. Kaynakların verimli kullanılması ile işletmelerin rekabet gücü artmaktadır. Dağıtım aracı seçimi, dağıtım planlamasında önemli bir konudur. Sistem verimliliğin direkt olarak etkilemektedir.

Tedarik zinciri sisteminde dağıtımında araçların en yüksek etkinlik ile çalışması için dağıtım rotalaması yapılması gerekmektedir. Dağıtım araçlarının efektif bir rotalama ile verimliliği arttırılmaktadır. Etkili bir rotalama ile kullanım kapasitesi maksimize edilip toplam mesafenin kısaltılması amaçlanmaktadır. Araç rotalamanın etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma kapsamında otomotiv fabrikasında yer alan araç rotalama problemi Clarke Wright algoritaması ile çözümlenmiştir. Literatürde araç rotalama problemlerine ilişkin çok sayıda araştırma yer almaktadır. ARP çözüm yöntemleri ile ilgili incelen literatürlere yer verilmiştir. geliştirdikleri matematiksel optimizasyon modelleri ile araç rotalama problemi geliştirilmiş çözüm yolları bulmuşlardır.

(Laporte G. , 1992), araştırmaları sonucunda kesin ve sezgisel olmak üzere iki tip model geliştirerek araç rotalama probleminin çözümüne katkıda bulunmuştur.

(Yazgan H., 2014) kapasite ve talep kısıtlı optimizasyon probleminin çözümü için Clarke ve Wright tasarruf algoritması ile bir çözüm geliştirmiştir. (Demircioğlu M., 2009) bir dağıtım firmasında homojen araçlı kapasite kısıtlı araç rotalama problemi çözümü için Clarke Wright Tasarruf Algoritması'nı kullanarak problemi çözümlemiştir.

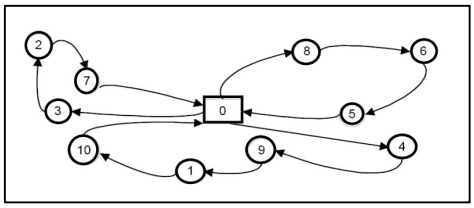
Çalışmalar incelendiğinde, endüstride milkrun süreçlerindeki rotalamayı esas alan çalışmaların yetersizliği saptanmıştır. Genel olarak klasik araç rotalama problemlerinin ele alındığı çalışmalar yaygındır. Bu çalışmada otomotiv fabrikasında yer alan milkrun sürecinde yer alan dağıtım rotalaması problemi Araç Rotalama Problemi çözüm yöntemlerinden Clarke Wright Tasarruf Algoritma'sı ile çözülerek süreç optimize edilmiştir. Fabrikadan alınan güncel veriler ile karşılaştırma yapılarak çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

A. Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri

Araç rotalama problemi(ARP), araçların optimum dağıtım rotalarının bulunması problemidir. Araç rotalama problemi modeli algoritması 1959'da ilk defa Dantzig ve Ramser öncülüğünde ortaya konulmuştur. 1964 yılında Clarke ve Wright, Dantzig ve Ramser'in teoremini katkıda bulunarak probleme sezgisel bir yaklaşım sunmuşlardır.

Günümüze kadar süregelen zamanda bu iki çalışmadan yola çıkarak birçok algoritma ortaya konulup bunların optimum ve optimuma yakın çözümü için birbirinden farklı metotlar geliştirilmiştir. Araç rotalama problemlerinin çözüm yöntemleri; kesin, klasik sezgiseller ve meta sezgiseller olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Optimal çözümü garanti eden kesin çözüm yöntemleri ve optimum çözüme yakın çözümleri kısa sürede bulan diğer çözüm yöntemleri bulunmaktadır.

Araç rotalama problemlerinde birçok farklı amaç fonksiyonu en iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu amaçlar şu şekildedir; taşıma maliyetlerini minimize edebilmek, araç sayısını azaltabilmek, tur sürelerini ve mesafelerini optimize edebilmek, toplam mesafeyi azaltabilmek ve toplam süreyi minimize edebilmektir.



Şekil 1. Araç rotalama problemi örnek çözüm şeması.

B. Araç Rotalama Problemleri Çözüm Yöntemleri

Kesin Çözüm Yöntemleri

Araç rotalama problemi için kesin çözüm yöntemleri, Gezgin Satıcı Problemi(GSP) geliştirilmesi ile oluşturulmuştur(Düzakın, Demircioğlu 2009). Kesin çözümü garanti eden yöntemler matematiksel programlama altyapısından gelen yaklaşımlardır ve optimal çözümü garanti ederler. Bu nedenle, kabul edilebilir bir sürede yaklaşık çözümler meta sezgisel çözüm yöntemlerine başvurulmaktadır. Problemlerin çözüm süresi problem boyutuna bağlı olarak üstel bir şekilde artış gösterir. Kesin çözüm yöntemleri: kesme düzlemi, dal ve sınır algoritması, dal ve kesme algoritması, dinamik programlama.

Klasik Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Araç rotalama problemleri için en iyi çözüm, elde edilecek olası rotalardan birisidir. En iyi çözüme ulaşabilmek için tüm alternatiflerin denenmesi gerekir. Ancak büyük kapsamlı problemlerde tüm alternatiflerin çözülmesi oldukça uzun sürmekte ve zaman almaktadır. Problemlere daha hızlı sonuç bulunabilmesi açısından sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Sezgisel yöntemler 1959-1990 yılları arasında geliştirilen, mümkün olmayan atamalar ile problem çözümüne başlayarak, her aşamada iki nokta arasına bir kenar eklenerek optimal sonuca ulaşmaya çalışırlar. Klasik sezgisel çözüm yöntemleri: Dantzig ve Ramser'in Yöntemi, en yakın komşu metodu, 2-Opt Algoritması, 3-Opt Algoritması, K-Opt Algoritması, Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması, Süpürme Algoritması, Lin-Kemighan Algoritması, Fisher ve Jaikumar Algoritması, Geliştirilmiş Petal Sezgiseli algoritmalarıdır.

Meta Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Meta sezgisel çözüm yöntemleri, klasik sezgisel çözüm yöntemleri ile kıyaslandığında zaman optimal olmayan alt seviye hareketlere izin vererek çözüm uzayında en iyi çözümün etkili bir şekilde bulunmasını sağlarlar. Geniş çaplı ve karmaşık araç rotalama problemlerin kesin çözüm algoritmaları ile çözülebilmesi oldukça uzun zaman almasına rağmen, meta sezgisel çözüm yöntemleri ile daha hızlı bir çözülebilmektedir.

Büyük ve karmaşık problemlerin çözümünde en hızlı yol meta sezgisel çözüm yöntemleridir. Optimum çözüme yakın sonucu kısa zaman diliminde sağlayabildikleri için oldukça sık kullanılmaktadırlar. Meta sezgisel çözüm yöntemleri: yapay arı kolonisi, karınca kolonisi, parçacık sürü optimizasyonu, tabu arama, benzetilmiş tavlama, genetik algoritmalardır.

C. *C*. OTOMOTİV YAN SANAYİİNDE TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ ULAŞTIRMA MODELİ OPTİMİZASYONU: ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Türk otomotiv s Türk otomotiv sektörü büyüyen ticaret hacmi ile son yıllarda oldukça önemli bir konumdadır. Otomotiv sektörünün, ekonominin en büyük ölçeğini kapsadığı sektörlerden biri olması sebebi ile yarattığı katma değer ile birlikte ülke ekonomisindeki önemi oldukça önemlidir. Çalışmanın amacı otomotiv yan sanayinde iç trim komponentleri alanında faaliyet gösteren bir fabrika için dağıtım kanallarının modellemesini yapmak ve hali hazırda fabrikanın karşılaştığı problemlere matematiksel modelleme yardımı ile çözüm bulmaktır.

Otomotiv fabrikasında uygulama yapılarak mevcut milkrun taşıma sistemi ile ilgili veriler elde edildikten sonra, araç rotalama problemi için geliştirilen algoritma mevcut sisteme uyarlanarak yeni bir dağıtım rotasının belirlenmesine imkan sağlayacaktır. En uygun dağıtım rotası bulunurken, dağıtım sistemini meydana getiren tüm kalemlerin maliyetlerinin azaltılması gerekmektedir. Uygun dağıtım rotası bulunabilmesi için araç rotalama problemlerinde kullanılan bir klasik sezgisel çözüm yöntemlerinden olan, Clarke Wright Tasarruf Algoritması yöntemi kullanılacaktır. Daha önceden modellenecek olan zaman pencereli araç rotalama problemi, tasarruf yöntemi kullanılarak çözülmeye çalışılacak ve uygulamadaki problem için uygun dağıtım rotaları bulunmaya çalışılacaktır.

Uygulamadaki sürecin karmaşık bir yapıda olması nedeni ile tasarruf yöntemiyle çözümlenmesi zaman alacağı için bilgisayar yardımı ile Excel ortamında çözümü yapılacaktır.

Yapılan çalışmada, otomotiv fabrikası ve tedarikçiler arasında kullanılan milk-run taşıma araçlarının toplam mesafe ve taşıma maliyetlerini minimize etmek amacıyla araç rotalama problemi ele alınarak çözüm önerisi oluşturulmuştur. Problemde bir ana üretim tesisi ve 10 tedarikçi fabrika bulunmaktadır.

- Her tedarikçiye kesinlikle bir defa uğranmalıdır.
- Rotada yer alan tedarikçilerin talepleri toplamı araç kapasitesini geçmemelidir.
- Tedarikçilere zaman pencereleri diliminde hizmet verilmelidir.
- Her bir rota, en fazla izin verilen süre içerisinde tamamlanmalıdır.
- Araç km'si başına geçen süre sabittir ve dış faktörlerden etkilenmemektedir.
- Boş kasaların fabrikaya geri dönüşü, kamyonun geri dönüşleri sırasında yapılmaktadır.
- Tedarikçilerin çalışma saatleri aynı kabul edilmiştir.

Matematiksel Model

Yapılan çalışmada, otomotiv fabrikası ve tedarikçiler arasında kullanılan milk-run taşıma araçlarının toplam mesafe ve taşıma maliyetlerini minimize etmek amacıyla araç rotalama problemi ele alınarak çözüm önerisi oluşturulmuştur. Problemde bir ana üretim tesisi ve 10 tedarikçi fabrika bulunmaktadır.

Problemin ve Kısıtların Tanımlanması

I *toplam tedarikçi sayısı*
Q *araç kapasitesi(ton)*
D_j *tedarikçiden toplanılacak yük miktarı*
t_{ij} *i ve j noktaları arasındaki ulaşım süresi*
m_{ij} *mesafe*
k *araçlar*
K *araç kümesi*
N_k *araç kapasitesi*

Karar Değişkenleri

x_{ij} *Aracın i noktasından çıkıp j noktasına geliyorsa 1, aksi halde 0 değerini almaktadır.*
p_{ij} *Aracın i noktasından sonraki yük miktarı.*
$i, j = 1,\ldots,I ; \quad i \neq j$

Amaç Fonksiyonu

$$Min\ Z = t.C \sum_{i=1}^{I}\ \sum_{j=1}^{I}(m_{ij}x_{ij}) \qquad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1,\ i\neq j}^{N} x_{ij} = 1, \qquad \forall j\ ,\ \ j\ \in \{1,\dots,N\} \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} x_{ij} = 1, \qquad \forall i\ ,\ \ i\ \in \{1,\dots,N\} \qquad (3)$$

$$\sum_{i,j=0}^{N} \sum_{i\neq j}^{N}\ x_{ij} + x_{ji}\ \leq 1, \qquad (4)$$

$$\sum_{i,j=0}^{N} q_i \sum_{j=0,\ i\neq j}^{N} x_{ij} \leq Q \qquad (5)$$

$$p_{jk} \leq N_k \qquad (6)$$

Amaç fonksiyonu (1) toplam kat edilen mesafenin minimize edilmesi gerektiğini ifade etmektedir. (2) ve (3) numaralı kısıt, bir tedarikçinin mutlaka bir araç tarafından ziyaret edilmesi gerektiği ve bir tedarikçiyi ziyaret eden aracın aynı zamanda o tedarikçiden hareket etmek zorunda olduğunu belirtmektedir. (4) numaralı kısıt, depoda başlamayan ve depoda bitmeyen turları elemekte kullanılmaktadır. (5) numaralı kısıt ise araçlara yapılan yüklemelerin araç kapasite değeri Q'yu geçmemesi gerektiğini belirtmektedir. Araç kapasitesi rota boyunca (6) numaralı kısıttan kontrol edilebilmektedir.

Metod

Bu çalışmada dikkate alınan araç rotalama problemini çözebilmek için klasik yöntemlerden Clarke-Wright Tasarruf Algoritması Excel çözücüsü ile çözümlenmiştir. Algoritmaya ait detaylar aşağıda verilmiştir.

Clarke Wright Kazançlar Algoritması Uygulaması

Clarke Wright Kazançlar Algoritması, ARP probleminin çözümünde kullanılan klasik bir yaklaşımdır. Algoritma, iki ayrı rotanın birleştirilmesi ve ayrı oldukları durumu kıyaslayarak ne kadar avantaj sağlanacağını ifade etmek için kullanılır. Bulgusal bir yaklaşım olduğundan dolayı optimal sonuç vermemekle birlikte hesaplama süresi açısından oldukça verimlidir. Oluşturulan model Clarke Wright Algoritması ile Excel ortamında çözülerek rotalar elde edilmiştir.

Tablo 1: Tedarikçi mesafe ve talep matrisi.

	X	Y	Talep (ton)
Fabrika	50,2	46,4	0
T1	42,3	48,2	3
T2	20,7	24,6	4
T3	16,6	14,7	2
T4	17,4	28,8	6
T5	17,6	27,5	4
T6	24,8	7,8	3
T7	26,9	48,4	2
T8	16,0	17,5	3
T9	24,0	27,0	5
T10	12,4	18,6	4

Tablo 1'de tedarikçi kuşbakışı konumları ve talep miktarları verilmiştir.
Tablo 2'de ise tedarikçiler ve fabrika arasındaki ulaşım sürelerinin saat cinsinden değerleri yer almaktadır.

Tablo 2: Tedarikçiler arası süre(saat) tablosu.

Süre (saat)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T1	0	0,3	0,5	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,5
T2		0	0,6	0,3	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,2
T3			0	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,3
T4				0	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,6
T5					0	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
T6						0	0,5	0,5	0,3	0,2
T7							0	0,2	0,5	0,5
T8								0	0,2	0,1
T9									0	0,2
T10										0

Tablo 3'de kamyon araç türünün kapasitesi yer almaktadır.

Tablo 3: Araç kapasitesi(ton)

Araç Kapasitesi	Hacim
Kamyon	20 ton

Tedarikçilerin temin edeceği günlük yük miktarları Tablo 4'de yer almaktadır.

Tablo 4: Günlük hacim yük(ton)

Günlük Yük	Hacim(ton)
T1	2
T2	3
T3	2
T4	4
T5	1
T6	0,5
T7	4
T8	6
T9	2
T10	3

Tablo 5'de tedarikçiler ve fabrika arasındaki uzaklıklar hesaplanarak matris oluşturulmuştur. Her bir tedarikçinin birbirlerine ve fabrikaya olan mesafeleri km cinsinden hesaplanarak tablo elde edilmiştir.

Tablo 5: Taşıma Mesafeler Tablosu(km)

	Fabrika	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Fabrika		7,90	29,50	33,60	32,80	32,60	25,40	23,30	34,20	26,20	37,80
T1		0,0	21,60	25,70	24,90	24,70	17,50	15,40	26,30	18,30	29,90
T2			0,0	4,10	3,30	3,10	4,10	6,20	4,70	3,30	8,30
T3				0,0	0,80	1,00	8,20	10,30	0,60	7,40	4,20
T4					0,0	0,20	7,40	9,50	1,40	6,60	5,00
T5						0,0	7,20	9,30	1,60	6,40	5,20
T6							0,0	2,10	8,80	0,80	12,40
T7								0,0	10,90	2,90	14,50
T8									0,0	8,00	3,60
T9										0,0	11,60
T10											0,0

Problemi tasarruf yöntemi ile çözmek için ilk olarak tasarruf miktarlarının hesaplanması gerekmektedir. Tasarruf miktarları hesaplanarak tasarruf matrisi elde edilerek rotalar oluşturulmuştur.

Tablo 6: Tasarruf matrisi.

	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T1	15,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
T2		29,5	29,5	29,5	21,3	17,1	29,5	22,9	29,5
T3			32	31,6	17,2	13	33,6	18,8	33,6
T4				32,4	18	13,8	32,8	19,6	32,8
T5					18,2	14	32,6	19,8	32,6
T6						21,2	25,4	25,4	25,4
T7							23,3	23,3	23,3
T8								18,2	34,2
T9									26,2
T10									

Tablo 7: Hesaplanan tasarruf miktarları

SIRA	TASARRUFLAR	1.TEDARİKÇİ	2.TEDARİKÇİ	TOPLAM TALEP	HAREKETLER
1	34,2	T8	T10	9	T8 ve T10
2	33,6	T3	T10	5	T3 , T8 ve T10
3	33,6	T3	T8	11	T3 , T8 ve T10
4	32,8	T4	T10	15	T3 , T8, T10, T4
5	32,8	T4	T8	15	T3 , T8, T10, T4
6	32,6	T5	T8	16	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
7	32,6	T5	T10	16	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
8	32,4	T4	T5	16	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
9	32,0	T3	T4	16	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
10	31,6	T3	T5	16	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
11	29,5	T2	T3	19	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
12	29,5	T2	T4	19	T3 , T8, T10, T4, T5,T2

13	29,5	T2	T5	19	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
14	29,5	T2	T8	19	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
15	29,5	T2	T10	19	T3 , T8, T10, T4, T5,T2
16	26,2	T9	T6	5	T9-T6
17	25,4	T6	T7	6,5	T9-T6-T7
18	25,4	T6	T9	3,5	T9-T6-T7
19	23,3	T7	T9	10	T9-T6-T7
20	23,3	T7	T9	6	T9-T6-T7
21	23,3	T7	T1	8,5	T9-T6-T7-T1

En büyük tasarruf miktarı T8 ile T10 arasındaki rotadır. Araç kapasitesine göre rotalama yapılmıştır. Tedarikçilerin talep miktarları ve kamyon kapasitesi dikkate alınmıştır. Tüm iterasyonlar sonucunda iki farklı rota bulunmuştur(T3-T8-T10-T4-T5-T2), (T9-T6-T7-T1). 2 araç ile tüm tedarikçilerden fabrikaya dağıtım gerçekleştirilecektir. 2 turda tüm malzemeler tedarikçilerden firmaya getirilecektir.

I. SONUÇLAR

Çalışmada otomotiv fabrikasının milkrun sürecinde yer alan tedarikçiler ile fabrika arasındaki rotalar belirlenerek hesaplanmıştır. Araç kapasitesinin 20 ton olduğu durumda dağıtım rotası T3-T8-T10-T4-T5-T2-T9-T10T6-T7-T2-T1 olarak hesaplanmıştır. Clarke Wright algoritması ile toplam tasarruf 105,8 km olarak hesaplanmıştır. Mevcut durumda kamyonetin aldığı yol 138,4 km olarak hesaplanan toplam rota 105,8 km'ye indirgenerek toplamda 32,6 km'lik bir tasarruf elde edilmiştir. Bu durumda aracın harcayacağı maliyet miktarı indirgenecektir. Kamyonet 100 km de 25 litre yakıt tüketimi gerçekleştirmektedir. Kamyonet yakıtının litre fiyatı mart ayı itibari ile 45 TL olarak dikkate alındığında 32,6 km'de araç 9,78 litre yakıt tüketimi gerçekleştirecektir. Bunun mali değeri 440 TL'ye denk gelmektedir. Bir fabrikadaki milkrun sürecini düşündüğümüzde bu maliyet aylık olarak 13203 TL ve yıllık olarak 160636 TL tasarruf sağlanmıştır.

II. TARTIŞMA

Tasarruf değeri küçük olsa bile büyük sistemdeki tüm dağıtım süreçlerinde uygulanması halinde algoritma sayesinde daha büyük tasarruf değerlerine ulaşılacağı düşünülmektedir. Literatürde yer alan diğer araç rotalama problemleri algoritmaları ile farklı çözümler bulunabilir çözüm yolları ve yöntemleri çeşitlendirilebilir.

III. ÇIKARIM

Clarke Wright tasarruf algoritması ile araç rotalama problemi çözülerek otomotiv fabrikasındaki milkrun sürecinde optimizasyon yapılmıştır. Algoritma sayesinde süreçte iyileştirme yapılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Tanyaş M., Karlı H. (2020). Lojistik yönetiminin dijital dönüşümü: Akıllı lojistik üzerine sistematik literatür haritalaması, Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi, 2020, 7(2), 613-632.

[2] Kulu M. (2006). Tedarik zinciri yönetimin ulaştırma modeli optimizasyonu: Otomotiv sektöründe bir uygulama. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[3] Tanyaş, M. (2002), Üretim Planlama ve Kontrol. İstanbul: İrfan Yayımcılık.

[4] Düzakın E. , Demircioğlu M. (2009). Araç rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri. Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi.

[5] Demircioğlu, M. (2009). Araç rotalama probleminin sezgisel bir yaklaşım ile çözümlenmesi üzerine bir uygulama. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.

[6] Yazgan, H. (2014). Talep ve kapasite kısıtlı optimizasyon problemi için yeni bir melez algoritma. Endüstri Mühendisliği Dergisi. 25(1): 16-28.

[7] Eryavuz, M., Gencer, C., 2001, "Araç rotalama problemine ait bir uygulama", Süleyman Demirel Üniversitesi, iktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Vol. 6, No. 1, pp. 139-155.

[8] Laporte, G.,. 1992 "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms", European Journal of Operational Research, Vol. 59, pp.345-358.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Kolonların Farklı Yerleştirilmesiyle Oluşturulan Bina Modellerinde Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanların İncelenmesi

*Esra MUTİ *,Ercan ÖZGAN [b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık ABD, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** esra.muti@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, Sakarya ili Serdivan İlçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binanın analizi yapılmıştır. Binada taşıyıcı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde ki farklı yerleşimlerinin yapının deprem davranışı ve performansı üzerinde ki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m uzunluğu ise 18 m'dir. Bina modelinin "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" ise 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla olmak üzere toplam 6 aks bulunmaktadır. Farklı kolon yerleşimi ile 3 bina modeli oluşturulmuş ve 3 bina modelinde de kirişler 30x60 cm ve döşeme kalınlığı da 15 cm seçilmiştir. Model binalarda asansör boşluğu 180x210 cm, merdiven boşluğu da 260x340 cm olarak bırakılmıştır. Oluşturulan 3 model binadan referans olan bina modeline 2018 deprem yönetmeliği şartlarına uygun olarak "x" ve "y" yönlerinde kolonlar yerleştirilmiş, diğer iki model binaya yerleştirilen kolonlar ise farklı şekillerde yerleştirilmiştir. İdeCad paket programı ile Referans bina modeli ve diğer iki bina modeline etki eden deprem yükleri ve deplasmanlar katlar bazında hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı bina planına kolonların farklı yerleştirilmesi durumunda binalara etki eden deprem yükleri ve katlarda oluşan deplasmanların değişimleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Betonarme bina, Deprem performansı, Kolon, Tasarım*

Examination of Earthquake Loads and Displacements on Floors in Building Models Created by Different Placement of Column

ABSTRACT

In this study, a reinforced concrete building located in Beşköprü neighbourhood of Serdivan District of Sakarya province was analysed. The effects of different placements of columns, which are load-bearing elements in the building, on the building's project, on the earthquake behaviour and performance of the building were examined. In the building model created for this purpose, the floor height is 3 meters and the building has ground floor + 3 floors. The building width is 15 m and the length is 18 m. While there are 4 axes with 5 meters intervals in the "x direction" of the building model, there are a total of 6 axes in the "y direction" with 3.5 m, 3 m, 5 m, 3 m and 3.5 m intervals. Three building models were created with different column placements, and in all three building models, beams were chosen as 30x60 cm and floor thickness was 15 cm. In model buildings, the elevator shaft is 180x210 cm and the stairwell is 260x340 cm. Columns were placed in the "x" and "y" directions in the reference building model of the three model buildings created, in accordance with the requirements of the 2018 earthquake regulations, and the columns placed in the other two model buildings were placed in different ways. Earthquake loads and displacements affecting the Reference building model and the other two building models were calculated on a floor basis with the IdeCad package program and the results were compared. If columns are placed differently in the same building plan, the earthquake loads acting on the buildings and the changes in the displacements occurring on the floors are shown.

Keywords: *Reinforced concrete building, Earthquake performance, Column, Design*

I. GİRİŞ

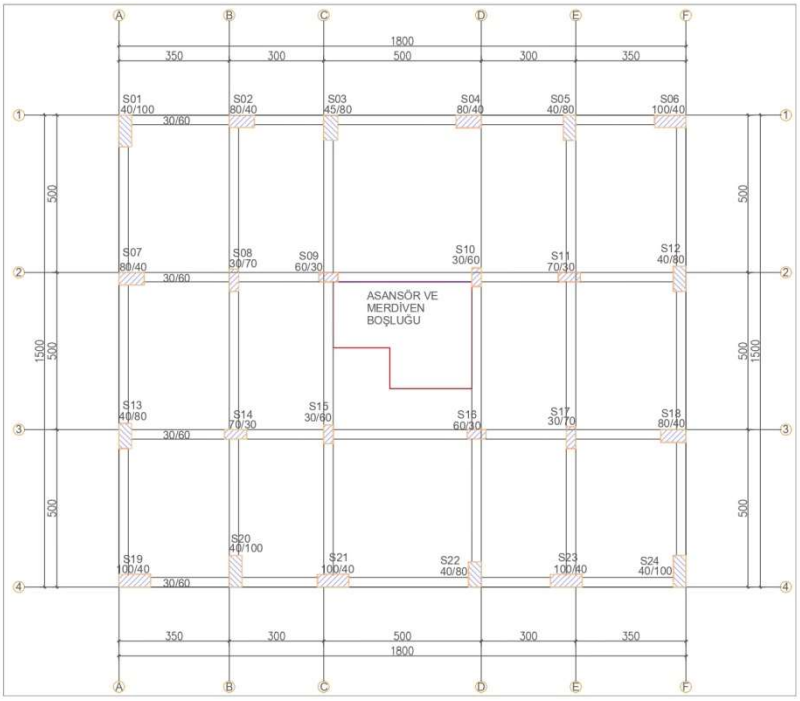
Modern şehirleşme süreçleri, dünya genelinde artan nüfus ve kentsel yoğunlaşma eğilimleri ile birlikte, yapıların tasarım ve inşasında daha karmaşık ve özen gerektiren bir süreci beraberinde getirmiştir[1]. Bu süreçte, özellikle deprem gibi doğal afetlerin etkisi altında bulunan bölgelerde, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği mühendislik topluluğu için temel bir öncelik haline gelmiştir. Betonarme yapılar, sağlam ve mukavemetli yapı özellikleri nedeniyle deprem riski yüksek bölgelerde tercih edilen yapı tipi olmuştur. Ancak, bu yapıların deprem performansını optimize etmek ve güvenliğini artırmak adına yapılan araştırmalar, sürekli olarak önemini korumaktadır.[2]

Depremler sırasında binaların ve altyapıların hasar görmesi yaygın bir durumdur. Deprem dayanıklı tasarım ve yapısal düzenlemeler, binaların ve diğer yapıların depremlere karşı daha dirençli hale getirilmesini amaçlar. Bu, güçlendirilmiş yapı elemanları, esneklik sağlayan tasarımlar, sismik izolasyon sistemleri ve yük dağılımını optimize eden stratejiler gibi çeşitli teknikleri içerebilir.[3] Deprem, birçok ülkede deprem bölgeleri olarak adlandırılan belirli bölgelerde daha sık meydana gelir. Bu bölgelerde, yapı kodları ve standartları genellikle deprem dayanıklılığını artırmak amacıyla daha sıkıdır. Deprem bölgelerinde inşa edilen yapıların, depreme dayanıklı olması, temel tasarımı ve yapı malzemeleri seçimi gibi faktörlerde önlemler alınması önemlidir.[4] Depremler doğal afetlerin en yıkıcı olanlarından biridir ve insanların güvenliği ve yapıların dayanıklılığı için ciddi tehdit oluştururlar. Depremlere karşı bilinçli bir şekilde hazırlık yapmak, deprem dayanıklı yapılar inşa etmek ve afet yönetimi önlemlerini uygulamak büyük önem taşır. Böylece, depremlerin etkileri en aza indirilebilir ve can kaybı ile hasarlar azaltılabilir. Her yapının belirli doğal frekansları vardır. Eğer deprem dalgalarının frekansı, yapının doğal frekansına yakın veya aynıysa, yapıda rezonans meydana gelir ve bu da yapıdaki hasarın artmasına neden olabilir.[5] Yapının bulunduğu zeminin özellikleri, deprem sırasındaki yapı davranışını büyük ölçüde etkileyebilir. Sıvılaşma, yumuşak zeminlerde meydana gelen ve yapıların hasar görmesine veya çökmelerine neden olabilecek bir olgudur.[6] Yapıların depremlerde daha iyi performans göstermeleri için depreme dayanıklı tasarım prensiplerine uygun olarak tasarlanması ve inşa edilmesi gerekir. Bu prensipler, yapı norm ve yönetmeliklerinde detaylı olarak belirtilir.[7] Bu sebeple, deprem ve yapı ilişkisi, yapı mühendisliği, jeoloji ve sismoloji gibi birçok bilim dalını kapsayan kapsamlı bir konudur. Bu nedenle, deprem riski olan bölgelerde yapılacak olan yapıların, depreme dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi hayati önem taşır. Son yıllarda yaşadığımız depremler ve oluşan can kayıpları ülkemizde depreme dayanıklı yapı analiz ve tasarımı konusunu daha da önemli hale getirmiştir. Deprem konusunda yapılan akademik çalışmalar sonucunda ve bilgisayar, teknoloji, malzeme ve imalat sektöründeki gelişmelere paralel olarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik kapsamına Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesine ilişkin 7. Bölüm eklenmiş ve 06.03.2007 tarih 26454 nolu resmi gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir (DBYBHY-2007).

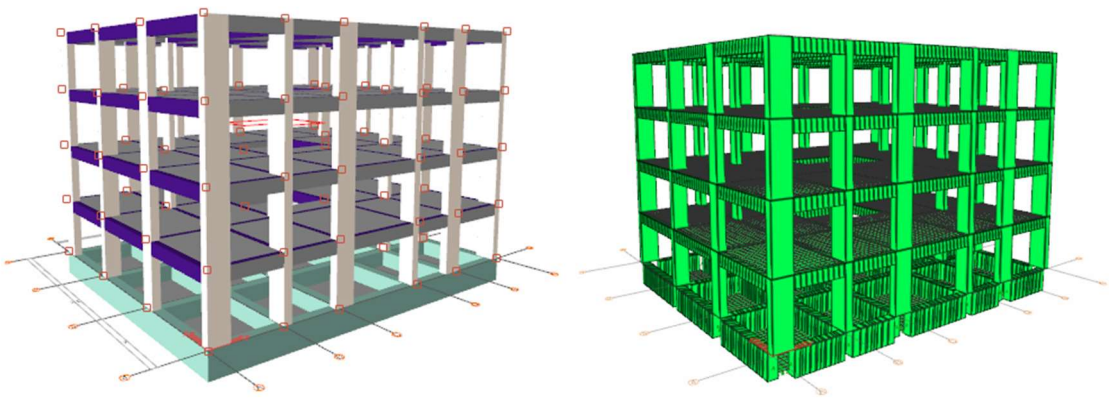
Bu çalışmada, betonarme bir yapı modelinde farklı şekillerde yerleştirilen kolonların, yapının deprem davranışına olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapının genel performansını iyileştirmek ve deprem sırasında meydana gelebilecek potansiyel hasarları en aza indirmek amacıyla projelerde kolon yerleşimlerinin 2018 deprem yönetmeliği şartlarına uygun ve doğru bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, aynı bina projesi üzerinde 3 farklı kolon yerleşimine sahip 3 ayrı bina modeli oluşturulmuş ve bu farklı kolon yerleşimlerine sahip 3 bina modelinde katlara etki eden deprem yükleri ve deplasmanlar bakımından detaylı olarak incelenmiştir. 3 farklı kolon yerleşimine sahip olan 3 bina modelinin analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve kolon yerleşiminin önemi her yönü ile ortaya konulmuş ve özellikle betonarme yapı tasarım yapan, uygulayan inşaat mühendisleri ve mimarlar başta olmak üzere tasarım süreçleri ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada analizi yapılan bina Sakarya ili, Serdivan ilçesi, Beşköprü mahallesinde bulunan betonarme bir binadır. Bu betonarme binada taşıyıcı yapı elemanlarından olan kolonların binanın projesi üzerinde ki farklı yerleştirilmesi durumunda Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanlar incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde kat yüksekliği 3 metre olup bina zemin +3 katlıdır. Bina genişliği 15 m uzunluğu 18 m'dir. Bina modelinin "x yönünde" 5'er metre ara ile 4 tane aks bulunurken "y yönünde" ise 3,5 m, 3 m, 5 m, 3 m ve 3,5 m aralıklarla olmak üzere 6 aks bulunmaktadır. Farklı kolon yerleşimi ile oluşturulan 3 bina modelinde de kirişler 30x60 cm ve döşeme kalınlığı da 15 cm seçilmiştir. Model binalarda asansör boşluğu 180x210 cm, merdiven boşluğu da 260x340 cm olarak bırakılmıştır. Tasarlanan bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünüşü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Tasarlanan Bina Modelinin Kat Planı

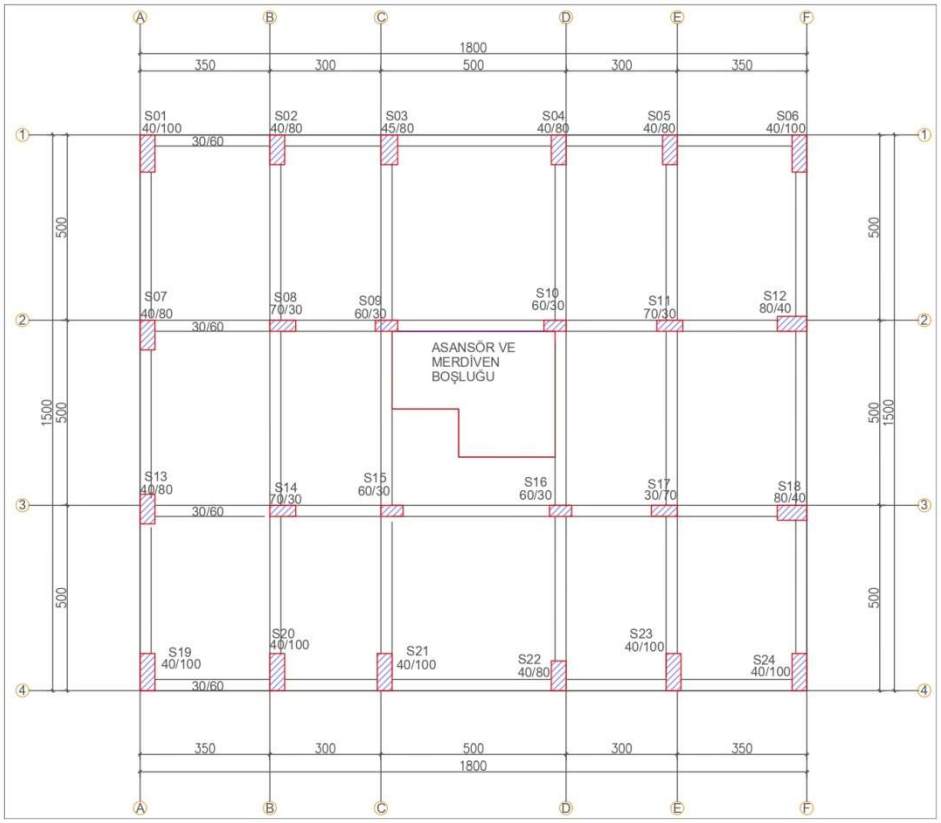


Şekil 2. Tasarlanan Bina Modelinin Katı Model ve Analiz Modeli Görselleri.

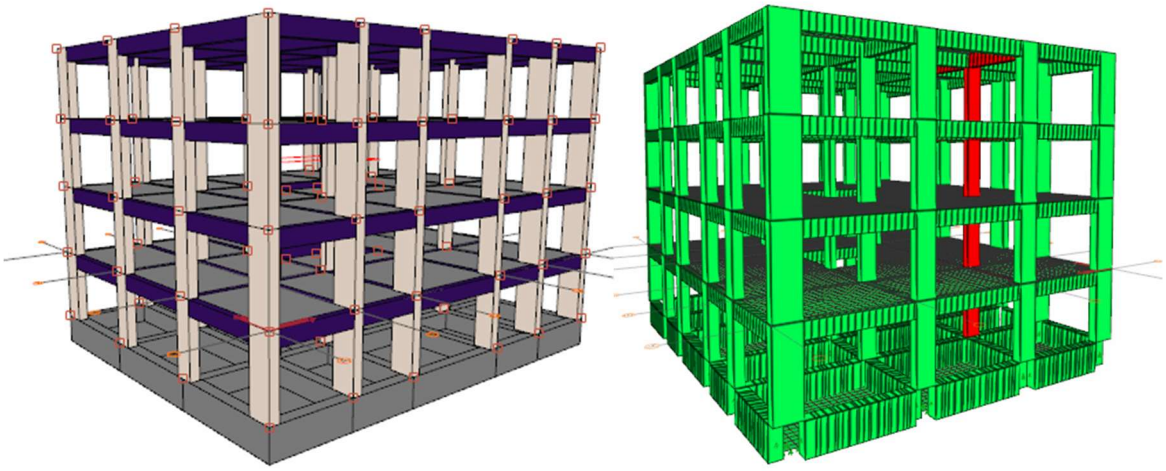
Analizler Deprem yer hareketi düzeyi DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 ve tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi) ve yerel zemin sınıfı ZD (orta sıkı kum yada çok katı kil tabakalarından oluşmuş zemin) esas alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, belirli aks aralıklarını temel Şekil 1' de planı gösterilmiş olan yapı tasarlanarak bu yapıya kolonlar yerleştirilmiştir. Mimari tasarım da referans olarak kullanılacak yapı modeli için kolonlar 2018 Deprem yönetmeliğine uygun ve binada "x" ve "y" yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde tarafımızca yönetmelik şartları ile "x ve y" yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilen kolonların olduğu bina modeli Referans model olarak alınmış, analiz edilmiş, deprem performansı ve deprem etkisi altında ki davranışları tespit edilmiştir.

Tarafımızca nizami olarak projelendirilen ve kolonları yerleştirilen bina modelinin deprem etkisi altında ki analiz sonuçlarının tamamı referans olarak alınmıştır. Bu aşamadan sonra tarafımızca oluşturulan referans proje sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek için projede tarafımızca yerleştirilen kolonların tamamı kaldırılarak sadece aksları olan 2 tane hiç kolon olmayan yeni modeller oluşturulmuştur. Sadece aksları olan bu iki yeni model bina planına piyasa da proje yapan bir mimar ve bir inşaat mühendisinden kolon yerleştirmeli istenmiştir. İnşaat mühendisinin oluşturduğu modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin

tamamında 24 kolon bulunmaktadır. Kolonları inşaat mühendisi tarafından yerleştirilen bina modelinin planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

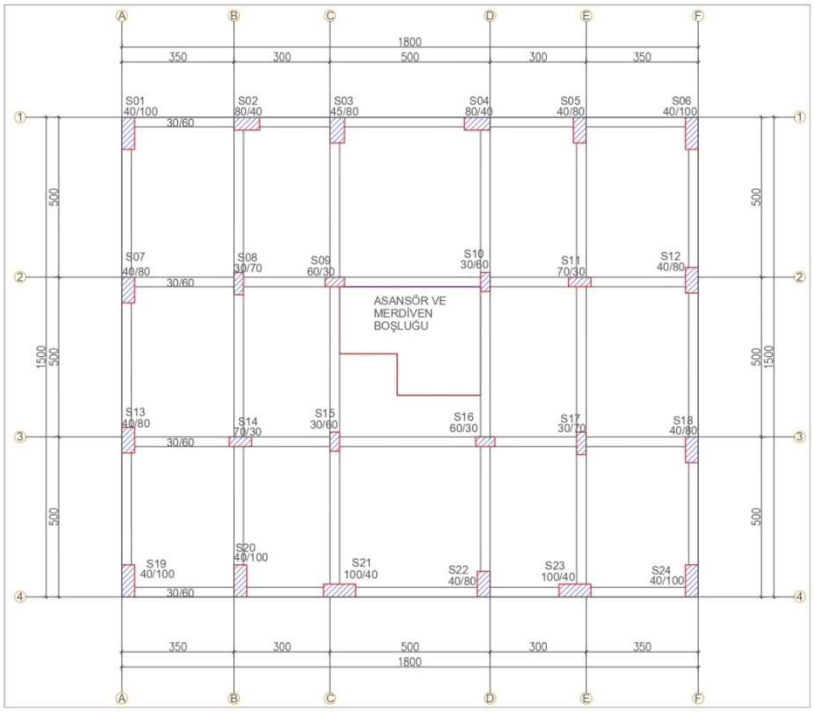


Şekil 3. 2.Modelin Kat Planı

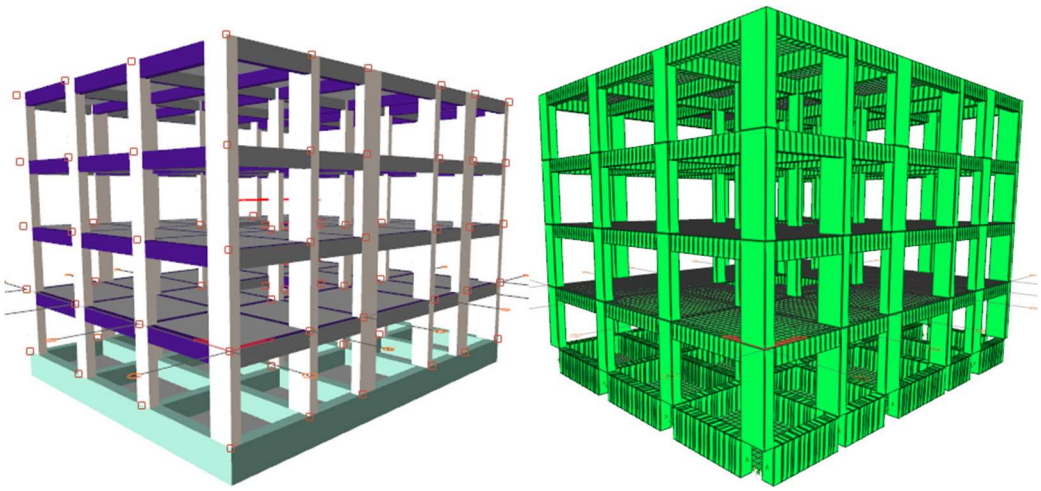


Şekil 4. Oluşturulan 2. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Sadece aksları olan ikinci model binada mimarın oluşturduğu modelde de "x" yönünde toplam 16 (yatay) ve "y" yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir. 3. Modelin bina modelinin planı ve 3 boyutlu görselleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 5. 3.Modelin Kat Planı



Şekil 6. Oluşturulan 3. Modelin Katı Model ve Analiz Modeli.

Tarafımızca nizami olarak kolon yerleşimi yapılan ve Referans olarak alınan bina modelimiz ile inşaat mühendisi ve mimar tarafından birbirinden bağımsız olarak kolon yerleşimi yapılan 3 farklı bina modelinde kolon yönlerinde ki değişimlerin binada Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanlar üzerinde ki etkileri incelenerek çok yönlü karşılaştırılmıştır. Oluşturulan bina modellerinin Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanlar esas alınarak analizleri ideCAD paket programı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

"Katlara Gelen Deprem Yükleri" terimi, yapı mühendisliği ve yapısal analiz alanında kullanılan bir terimdir. Deprem yükleri, bir binanın veya yapısal sistemin deprem sırasında maruz kaldığı kuvvetlerdir. Katlara gelen deprem yükleri ise, çok katlı bir binanın her bir katına düşen ve o katta etkili olan deprem kuvvetlerini ifade eder. [8] Bir binanın katlara gelen deprem yükleri, binanın yapısı, yerel zemin koşulları, deprem etkisi altındaki bölgenin jeolojik özellikleri ve binanın geometrisi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Yapı mühendisleri, bu yükleri belirlemek ve binanın her bir katının bu yükleri nasıl taşıyacağını hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanırlar. Bu hesaplamalar, binanın sağlamlığını sağlamak ve deprem sırasında güvenli kalmasını sağlamak amacıyla yapılır. [9]

Oluşturulan 3 bina modeli Katlara Gelen Deprem Yükleri bakımından karşılaştırıldığında önce X yönü için tablo oluşturulmuştur. Referans modelin Fx değerleri 2. Ve 3.modelden daha az çıkmıştır. Oluşturulan 3 bina modeli Katın Burulma Momenti (T) bakımından karşılaştırıldığında önce X yönü için tablo oluşturulmuştur. Referans modelin T değeri 2. Ve 3.modelden daha az çıkmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Katlara Etkiyen Yatay Yükler X Yönü için

Model Binalar	Katlar	Fx* [tf]	Fx* [tf]	T** [tfm]	Fark	% Fark
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	76.5750	76.5750	57.4312	0,00	0,00
	2. Kat	69.2105	69.2105	51.9078	0,00	0,00
	1. Kat	46.1403	46.1403	34.6052	0,00	0,00
	Zemin Kat	23.0702	23.0702	17.3026	0,00	0,00
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	76.6829	76.6829	57.5122	0,081	0,14
	2. Kat	69.3080	69.3080	51.9810	0,0732	0,14
	1. Kat	46.2053	46.2053	34.6540	0,0488	0,14
	Zemin Kat	23.1027	23.1027	17.3270	0,0244	0,14
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	77.5239	77.5239	58.1429	0,7117	1,24
	2. Kat	70.0681	70.0681	52.5511	0,6433	1,24
	1. Kat	46.7121	46.7121	35.0341	0,4289	1,24
	Zemin Kat	23.3560	23.3560	17.5170	0,2144	1,24

*Fx: Kullanılan yönteme göre hesaplanan X yönü deprem kuvveti

**T: Katın burulma momenti

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Katlara Etkiyen Yatay Yükler X yönü için %0,14 ve %1,24 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok katlı binalarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ve sık sık hem büyük hem de küçük depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Daha sonra oluşturulan 3 bina modeli Katlara Gelen Deprem Yükleri bakımından Y yönü için karşılaştırılmıştır. Referans modelin Fy değerleri 3.modelden daha az çıkmıştır. Daha sonra oluşturulan 3 bina modeli Katın Burulma Momenti (T) Y yönü için karşılaştırılmıştır. Referans modelin T değeri 3.modelden daha az çıkmıştır.(Tablo 2).

Tablo 2. Katlara Etkiyen Yatay Yükler Y Yönü için

Model Binalar	Katlar	Fy* [tf]	Fy* [tf]	T** [tfm]	Fark	% Fark
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	71.7813	71.7813	64.6032	0,00	0,00
	2. Kat	64.8778	64.8778	58.3901	0,00	0,00
	1. Kat	43.2519	43.2519	38.9267	0,00	0,00
	Zemin Kat	21.6259	21.6259	19.4634	0,00	0,00
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	66.9123	66.9123	60.2210	-4,3822	-6,78
	2. Kat	60.4771	60.4771	54.4294	-3,3907	-6,78
	1. Kat	40.3180	40.3180	36.2862	-2,6405	-6,78
	Zemin Kat	20.1590	20.1590	18.1431	-1,3203	-6,78
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	75.1642	75.1642	67.6478	3,0446	4,71
	2. Kat	67.9354	67.9354	61.1418	2,7517	4,71
	1. Kat	45.2903	45.2903	40.7612	1,8345	4,71
	Zemin Kat	22.6451	22.6451	20.3806	0,9172	4,71

*Fy: Kullanılan yönteme göre hesaplanan Y yönü deprem kuvveti

**T: Katın burulma momenti

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Katlara Etkiyen Yatay Yükler Y yönü için %4,71 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok katlı binalarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ve sık sık hem büyük hem de küçük depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Göreli kat öteleme, yapı mühendisliği ve yapısal analizde kullanılan bir terimdir. Çok katlı yapılar veya binalar gibi yapılar, deprem sırasında katlar arasında göreli bir hareket yaşayabilirler. Bu hareket, depremin binanın farklı katlarına farklı şekilde etki etmesiyle oluşur.[10]
Göreli kat öteleme, bir binanın farklı katları arasındaki yatay deplasman farkını ifade eder. Deprem sırasında, zeminin etkisiyle binanın üst katları alt katlara göre bir miktar öne veya arkaya doğru kayabilir veya yana doğru kayabilir. Bu göreli hareket, binanın katlarının farklı esneklik özelliklerine veya deprem dalgalarının farklı katlar üzerindeki etkisine bağlı olarak değişebilir.[11]
Oluşturulan 3 bina modeli Göreli Kat Öteleme Değerleri bakımından karşılaştırılmış ve katlar bazında tablo oluşturulmuştur. Referans modelin öteleme değerleri 3.modele daha yakın, 2.modelden daha az çıkmıştır. (Tablo 3).

Tablo 3. Göreli Kat Öteleme Değerleri

Model Binalar	Katlar	Göreli Öteleme λδi(max)*/hi**	Fark
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	0.0046 <= 0.008 √	0,00
	2. Kat	0.0063 <= 0.008 √	0,00
	1. Kat	0.0072 <= 0.008 √	0,00
	Zemin Kat	0.0050 <= 0.008 √	0,00
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	0.0054 <= 0.008 √	0,0008
	2. Kat	0.0070 <= 0.008 √	0,0007
	1. Kat	0.0077 <= 0.008 √	0,0005
	Zemin Kat	0.0056 <= 0.008 √	0,0006
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	0.0046 <= 0.008 √	0,00
	2. Kat	0.0063 <= 0.008 √	0,00
	1. Kat	0.0073 <= 0.008 √	0,0001
	Zemin Kat	0.0050 <= 0.008 √	0,00

* δi,max(X) =(X) deprem doğrultusu için, binanın i'inci katındaki kolon veya Perdeler için etkin göreli kat ötelemesi, **hi = i'inci katın yüksekliği

Tablodan da görüldüğü gibi aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Göreli Kat Öteleme Değerleri için %0,008 ve %0,001 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Büyük inşaat projelerinde ve çok katlı binalarda bu farkın daha da artabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ve sık sık hem büyük hem de küçük depremler yaşanan ülkemizde bu farklılıkların önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan 3 bina modeli Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması X Yönü için karşılaştırıldığında Referans modelin öteleme değerleri 3.modele daha yakın, 2.modelden daha az çıkmıştır. (Tablo 4).

Tablo 4. Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması X Yönü

		+5%		-5%	
Model Binalar	Katlar	Eleman	Göreli Öteleme λδi(max)*/hi**	Eleman	Göreli Öteleme λδi(max)*/hi**
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	S306	0.00383 <= 0.008 √	S319	0.00359 <= 0.008 √
	2. Kat	S202	0.00571 <= 0.008 √	S219	0.00522 <= 0.008 √
	1. Kat	S104	0.00674 <= 0.008 √	S119	0.00607 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ04	0.00491 <= 0.008 √	SZ22	0.00438 <= 0.008 √
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	S304	0.00349 <= 0.008 √	S322	0.00344 <= 0.008 √
	2. Kat	S205	0.00557 <= 0.008 √	S222	0.00549 <= 0.008 √
	1. Kat	S104	0.00681 <= 0.008 √	S122	0.00673 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ04	0.00520 <= 0.008 √	SZ22	0.00513 <= 0.008 √
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	S304	0.00360 <= 0.008 √	S321	0.00340 <= 0.008 √
	2. Kat	S202	0.00568 <= 0.008 √	S221	0.00527 <= 0.008 √
	1. Kat	S104	0.00690 <= 0.008 √	S123	0.00632 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ04	0.00504 <= 0.008 √	SZ22	0.00454 <= 0.008 √

* δi,max(X) =(X) deprem doğrultusu için, binanın i'inci katındaki kolon veya

Perdeler için etkin göreli kat ötelemesi, **hi = i'inci katın yüksekliği

Oluşturulan 3 bina modeli Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması Y Yönü için karşılaştırıldığında Referans modelin farklı elemanlar için öteleme değerleri, 2. ve 3. modelden daha az çıkmıştır. (Tablo 5).

Tablo 4. Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması Y Yönü

		+5%		-5%	
Model Binalar	**Katlar**	**Eleman**	**Göreli Öteleme λδi(max)*/hi****	**Eleman**	**Göreli Öteleme λδi(max)*/hi****
1.Referans Model (Tarafımızca hazırlanan)	3. Kat	S324	0.00450 <= 0.008 √	S301	0.00455 <= 0.008 √
	2. Kat	S212	0.00632 <= 0.008 √	S213	0.00631 <= 0.008 √
	1. Kat	S112	0.00716 <= 0.008 √	S113	0.00708 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ12	0.00495 <= 0.008 √	SZ07	0.00490 <= 0.008 √
2. Model (İnş. Müh. Tarafından hazırlanan)	3. Kat	S306	0.00543 <= 0.008 √	S319	0.00472 <= 0.008 √
	2. Kat	S206	0.00704 <= 0.008 √	S207	0.00600 <= 0.008 √
	1. Kat	S106	0.00767 <= 0.008 √	S113	0.00639 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ12	0.00555 <= 0.008 √	SZ07	0.00448 <= 0.008 √
3. Model (Mimar tarafından hazırlanan)	3. Kat	S318	0.00447 <= 0.008 √	S301	0.00446 <= 0.008 √
	2. Kat	S206	0.00610 <= 0.008 √	S213	0.00602 <= 0.008 √
	1. Kat	S118	0.00675 <= 0.008 √	S107	0.00662 <= 0.008 √
	Zemin Kat	SZ12	0.00463 <= 0.008 √	SZ07	0.00457 <= 0.008 √

* δi,max(Y) =(Y) deprem doğrultusu için, binanın i'inci katındaki kolon veya

Perdeler için etkin göreli kat ötelemesi, **hi = i'inci katın yüksekliği

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin+3 katlı bir binada farklı kolon yerleşimi yapılan 3 ayrı bina modeli oluşturularak bu model binaların TBDY-2018 yönetmeliğinde belirtilen esaslara göre İdeCAD programı ile performans analizleri yapılmış ve bu 3 model binanın deprem etkisi altında ki davranışları incelenerek karşılaştırılmıştır. Analiz ve değerlendirmeler sonucunda yatay deprem yüklerine maruz kalan kolon ve perde duvar gibi düşey taşıyıcı elemanlar planda x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilirse yapı depreme karşı x veya y yönlerinde aynı davranışı gösterecek ve yapı üzerinde ki deprem etkileri azalacaktır. Ancak bina tasarlanan binalarda yerleştirilen kolon ve perde duvarlar x ve y yönlerinde aynı Rijitliği sağlayacak şekilde yerleştirilmezlerse deprem etkileri binanın Rijitliğinin az olduğu doğrultuda çok büyük hasarlara ve göçmelere neden olacaktır. Oluşturulan referans modelde x ve y doğrultusunda kolonlar eşit olarak yerleştirilmiştir. 2. modelde "x" yönünde toplam 10 (yatay) ve "y" yönünde de (dikeyde) toplam 14 tane olmak üzere bina modelinin tamamında 24 kolon bulunmaktadır. 3.modelde de "x" yönünde toplam 16 (yatay) ve "y" yönünde toplam 8 (dikey) kolon olmak üzere 24 kolon yerleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarından; Oluşturulan 3 bina modeli Katlara Gelen Deprem Yükleri bakımından karşılaştırıldığında X yönü için Referans modelin Fx değeri üçüncü katta 76.5750, 2. Model üçüncü katta 76.6829 ve 3.model üçüncü katta 77.5239 çıkmıştır. Katlara Gelen Deprem Yükleri bakımından karşılaştırıldığında X yönü için Referans modelin Fx değeri zemin katta 23.0702, 2. Model zemin katta 23.1027 ve 3.model zemin katta 23.3560 çıkmıştır.

Oluşturulan 3 bina modeli Katın Burulma Momenti (T) bakımından karşılaştırıldığında önce X yönü için referans modelin T değeri üçüncü katta 57.4312, 2. Model üçüncü katta 57.5122 ve 3.model üçüncü katta 58.1429 çıkmıştır. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Katlara Etkiyen Yatay Yükler X yönü için %0,14 ve %1,24 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Katlara Gelen Deprem Yükleri Y yönü bakımından karşılaştırıldığında Referans modelin Fy değeri üçüncü katta 71.7813, 3.model üçüncü katta 75.1642 çıkmıştır. Oluşan Fy değerleri Fx değerlerine göre bir birbirine daha yakın çıkmıştır. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Katlara Etkiyen Yatay Yükler Y yönü için %4,71 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

3 bina modeli Göreli Kat Öteleme Değerleri bakımından karşılaştırıldığında ise Referans modelin ve 3. Modelin üçüncü katta öteleme değerini 0.0046 çıkmıştır, 2.modelin ise öteleme değeri diğer iki modelden daha fazla ve 0.0054 çıkmıştır. Aynı proje olmasına rağmen kolonların farklı yerleştirilmesi ile Göreli Kat Öteleme Değerleri için %0,008 ve %0,001 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Oluşturulan 3 bina modeli Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması X Yönü için karşılaştırıldığında Referans modelin en yüksek öteleme değerleri, 2.ve 3. modelden daha az çıkmıştır. Referans modelde bu değer 0.00674 iken, diğer modellerde 0.00681 ve 0.00690 çıkmıştır.

IV. TARTIŞMA

Analiz sonuçlarına bakıldığında oluşturulan 2. ve 3'ncü modelde kolon boyutlarını değiştirmeden sadece yönlerini değiştirmek bile Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanların büyük ölçüde değişmesine neden olmuştur.

Katlara gelen deprem yükleri, yapıların tasarımında ve güvenliğinde temel bir rol oynar, çünkü doğru bir şekilde hesaplanması, yapıların depreme karşı dayanıklı olmasını sağlar. Aynı şekilde yapısal analizlerde ve tasarımlarda göreli kat öteleme, binanın deprem performansını değerlendirmek ve geliştirmek için önemli bir parametre olarak dikkate alınır. Bu sayede yapı, deprem sırasında daha güvenli olacak şekilde tasarlanabilir ve inşa edilebilir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı Türkiye gibi deprem kuşağında bulunan bir ülke için çok önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, aynı plan üzerinde farklı yönlerde ve boyutlarda yerleştirilen kolonların bina üzerinde ki Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanlar bakımından etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bina tasarımı yapan mimar veya inşaat mühendislerinin tasarımda yerleştirdikleri kolonların binanın Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanlar bakımından bina üzerinde ki etkilerini nasıl değiştirdiği oluşturulan 3 bina modelinin ideCAD programı ile analiz edilmesi sonucunda ortaya konulmuştur.

V. ÇIKARIM

Bu sonuçlara göre binaların mimari tasarımı ve çizimi çizim safhasında kolonların mimar ve mühendisler tarafından doğru yerleştirilmesi durumunda Katlara Gelen Deprem Yükleri ve Deplasmanların azaldığı gösterilmiştir. Bu sayede taşıyıcı sistem tasarımında kolon yerleşiminin doğru yapılması, tasarım safhasında ki hatalarını en aza indirilmesi ile deprem açısından daha güvenilir, depreme daha dayanıklı yapılar tasarlanabileceği, böylece deprem risklerinin azaltılarak can ve mal güvenliğinin sağlanabileceği, ekonomik kayıpların azaltılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Alkan, Abdullah. Çok katlı konut yapılarında kullanıcıya özelbir planlama denemesi (Panoroma apartmanı örneği). MS thesis. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, 2019.

[2] Varol, K. O. Ç. "Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi." Çanakkale onsekiz mart üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi 2.1 (2016): 36-57.

[3] Albakour, Amr & Ipek, Cengiz. (2023). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı.

[4] Bikçe, M. (2017). Taken and Need to Take Precautions in Turkey's Earthquakes . International Journal of Engineering Research and Development , 9 (2) , 24-31 . DOI: 10.29137/umagd.351464

[5] Cevher, M. , Keçeli, A. "Zemin Hakim Periyodu ve Bina Yüksekliği Rezonans İlişkisi" . Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi 17 (2018): 203-224 https://dergipark.org.tr/tr/pub/uybd/issue/41586/463982

[6] Alpaslan, N. (2013). Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması . Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi , 3 (2) , 67-89 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/buyasambid/issue/29820/320770

[7] Şimşek Şengül, Ü. (2023). Deprem Etkisi Altında Yapıların Yatay Ve Düşey Doğrultudaki Düzensizliklerinin İncelenmesi . TÜRKAV Kamu Yönetimi Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi , 3 (4) , 215-231 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkav/issue/77993/1283428

[8] Şahin, Yalçın. Deprem kuvvetlerine karşı betonarme perdelerin davranışı ve betonarme bir yüksek yapının projelendirilmesi. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

[9] *Sünbül, A. Bengü. Yüzeysel temelli 4-6 katlı binaların deprem sırasındaki davranışlarının parametrik incelenmesi. Diss. Sakarya Universitesi (Turkey), 2010.*

[10] Tuğba, İ. N. A. N., and Koray Korkmaz. "Düşey doğrultudaki yapı düzensizliklerinin incelenmesi." Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi 28.3 (2012): 240-248.

[11] Uysal, Yusuf, Ceyhun Aksoylu, and Musa Hakan Arslan. "Betonarme Çerçeveli Binaların Tasarımında Kullanılan Sonlu Eleman Programlarının TBDY-2019'da Yer Alan Periyod, Taban Kesme Kuvveti ve Göreli Kat Ötelemesi Bağlamında Değerlendirilmesi." International Journal of Engineering Research and Development 14.2 (2022): 941-957.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Parametric Evaluation of Slip Models for Reinforced Concrete Columns with Smooth Bars

Muhammed Nadir OLABİ[a*]

[a]Bolu Abant İzzet Baysal University, Faculty of Architecture, Bolu/Türkiye.
[*]**Corresponding Author:** nadirolabi@ibu.edu.tr

ABSTRACT

The seismic risk associated with old and existing buildings in Türkiye has surged in significance, emphasizing the need for a detailed exploration of their behavior, particularly in the face of earthquake hazards. Given the widespread use of smooth bars in older reinforced elements, understanding the nonlinear response of these elements is imperative for robust assessment studies. This research inspects the nonlinear behavior of reinforced concrete columns constructed with smooth bars. Employing a numerical model developed utilizing the OpenSees platform, the study meticulously compares results with experiments conducted on similar columns. Moreover, the investigation evaluates the main parameters governing three widely-used slip models to comprehend their impact on the overall column response, and provides recommendations for suitable values. Findings underscore that slip models designed for ribbed bars exhibit limited suitability for columns featuring smooth bars. Additionally, modifications to these models are considered essential to incorporate axial load forces, given the significant influence of axial load ratio on the behavior of columns with smooth bars.

Keywords: *OpenSees, Parameters, RC column, Slip model, Smooth bars.*

Düz Yüzeyli Donatılı Betonarme Kolonlar için Analitik Sıyrılma Modellerinin Parametrik Değerlendirilmesi

ÖZET

Türkiye'deki eski ve mevcut binaların deprem riski önemli ölçüde artmıştır, bu da davranışlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekliliğini vurgulamaktadır, özellikle de deprem tehlikesiyle karşı karşıya olduklarında. Eski donatılı elemanlarda yaygın olarak kullanılan düz yüzeyli çubukların anlaşılması, sağlam değerlendirme çalışmaları için zorunlu bir gerekliliktir. Bu araştırma, düz yüzeyli çubuklarla inşa edilmiş betonarme kolonların doğrusal olmayan davranışını incelemektedir. OpenSees platformu üzerinde geliştirilen bir sayısal model kullanılarak yapılan bu çalışma, sonuçları benzer kolonlarda yapılan deneylerle titizlikle karşılaştırmaktadır. Ayrıca, üç yaygın kullanılan sıyrılma modelini kontrol eden ana parametreleri değerlendirerek bu modellerin genel kolon tepkisi üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlamakta ve kullanılabilecek uygun değerler için bazı öneriler sunmaktadır. Bulgular, nervürlü çubuklar için tasarlanan sıyrılma modellerinin düz yüzeyli çubukları içeren kolonlar için sınırlı uygunluk gösterdiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu modellerin düz yüzeyli çubukları içeren kolonların davranışındaki önemli etkisi göz önüne alındığında, bu modellerin modifikasyonlarının zorunlu olduğu düşünülmektedir. Ek olarak, düz yüzeyli çubukları içeren kolonların davranışını etkileyen eksenel kuvvetin de modellere dahil edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Betonarme kolon, Düz yüzeyli donatı, OpenSees, Parametreler, Sıyrılma modeli.*

I. Introduction

Existing buildings in Türkiye and similar countries have a significant portion of their stock, particularly reinforced concrete (RC) structures built before 2000s, fails to meet the requirements of current seismic codes [1]. For example, concrete quality in buildings constructed before 2000 generally ranges between 8-16 MPa, with the use of smooth, non-ribbed bars as reinforcement steel [2]-[3]. Due to the low concrete quality and the use of smooth bars in reinforced concrete columns, the bond strength significantly diminishes, leading to an increased risk of bar slip. In columns with ribbed reinforcement, the displacement due to longitudinal bar slip is generally negligible, whereas in columns with smooth bars, the contribution of slip displacement to total horizontal displacement is very considerable [4]. Accurately determining the displacement capacities of both reinforced concrete columns and the overall structure is crucial for assessing the seismic performance of existing buildings. Therefore, failure to accurately account for the effects of bar slip in calculations may result in inaccuracies in the calculation of displacements and internal forces in reinforced concrete structures.

Extensive experimental studies have been conducted on reinforced concrete columns constructed with smooth bars. Opabola et al. [5] created a database consisting of 65 experimentally tested reinforced concrete columns built with smooth bars. Using this database, their analytical study revealed the development of a fixed-end rotation mechanism when a single crack occurred at the column-foundation or column-junction interface, this one big crack is majorly occurred from the bar slip mechanism.

To realistically determine the seismic performance of the reinforced concrete building stock in Türkiye, it is imperative to examine the behavior of RC columns with smooth bars. Although some slip models considering the effect of longitudinal bar slip have been developed for the numerical analysis of reinforced concrete columns, these models involve complex stress equations and lengthy computational steps [6]-[7]. Most of the models recommended for bar slip are developed based on columns with ribbed bars and provides realistic results for this kind. On the other hand, the accuracy of these models for columns found in existing buildings and build with smooth bar is questionable and further investigation is required.

The primary objective of this study is to assess the efficacy of three distinct analytical slip models, as proposed in the existing literature, when applied to smooth bars commonly found in older structures. Given that these models are typically designed for ribbed bars, it becomes crucial to analyze their performance in simulating slip behavior specific to smooth bars. This examination is imperative for accurately characterizing the nonlinear slip behavior of RC columns constructed with smooth bars. Additionally, the study aims to determine the influence of bar slip phenomena on the overall response of these columns. To achieve this, numerical models implemented through the OpenSees [8] platform are employed. These models simulate the lateral displacement-load relationship of two experimentally tested RC columns featuring smooth bars. The investigation specifically focuses on analyzing the impact of key parameters within the analytical models on the numerical simulations.

II. Analytical Slip Models

The behavior of smooth bars in reinforced concrete columns, characterized by the bond stress-slip relationship, is crucial for structural integrity. Bar slip, defined as the relative displacement between steel bars and concrete, significantly influences the horizontal displacement in columns and sometimes exceeding 25% of the total lateral displacement [4, 9]. In general, the tensile test is a common experimental procedure to evaluate steel adhesion and slip performance. Extensive research, spanning decades, has resulted in calibrated models such as those proposed by Eligehausen et al. [10] and Hawkins [11], shedding light on the intricate interaction between concrete and steel.

Recent studies by Verderame et al. [6] and others have delved into the slip performance of smooth bars, providing valuable insights through monotonic and cyclic loading tests. Additionally, analytical models by Lehman and Moehle [12] and Alsiwat and Saatcioglu [13] introduce stepped bond stress-slip models, capturing the elastic, yielding, strain-hardening, and pullout-cone regions along the bar length.

Understanding and accurately modeling the behavior of smooth bars in reinforced concrete structures is essential for ensuring the resilience and safety of these constructions under various loading conditions. In this research, three uncomplicated and easily applicable analytical slip models are selected for parametric evaluation in the numerical investigation.

A. Sezen and Setzler Model

In this model, Sezen and Setzler [14] introduced a slip model that addresses the longitudinal reinforcement detachment from the foundation concrete in reinforced concrete columns subjected to monotonic horizontal loading (Fig. 1).

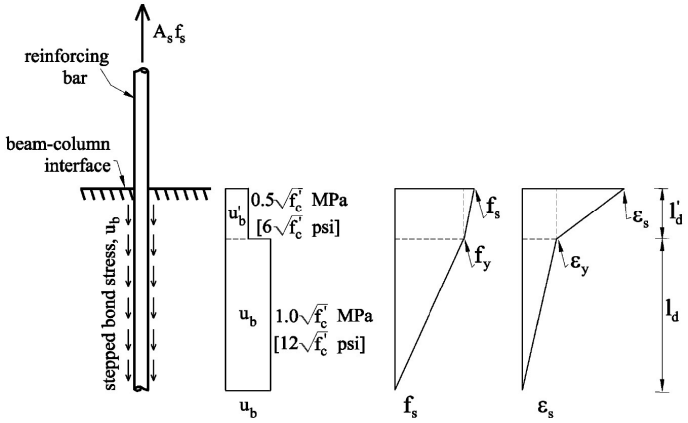


Fig. 1. Slip model proposed by Sezen and Setzler [14].

$$slip = \frac{\varepsilon_s f_s d_b}{8u_b} \qquad \text{for} \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \tag{1}$$

$$slip = \frac{\varepsilon_s f_s d_b}{8u_b} + \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_y)(f_s - f_y)d_b}{8u'_b} \qquad \text{for} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \tag{2}$$

In these equations, d_b represents the diameter of the longitudinal reinforcement, f_s and ε_s denotes the stress and strain in the reinforcement, respectively, also, u_b and u'_b is the elastic and non-elastic bond stress of the longitudinal reinforcement, respectively. The bond stresses are calculated according to Lehman and Moehle [12] as $u_b = 1.0\sqrt{(f'_c)}MPa$ and $u'_b = 0.5\sqrt{(f'_c)}MPa$. The rotation occurring at the element end during reinforcement slip is computed as $\theta_s = slip/(d - c)$, and the horizontal displacement is given by $\Delta_s = \theta_s . H$. Here, H is the column height, and d and c are the distances from the outermost compression fiber to the center of the tensile reinforcement and to the neutral axis, respectively.

B. Steel Model Modification

To account for the effect of reinforcement slip in the response of reinforced concrete elements, a distinct approach has been adopted at the material level. Wang et al. [15] proposed a modified steel material model using a bilinear stress-strain relationship, taking into account both compression and tension portions to simulate the cyclic response of reinforcement slip (Fig. 2). As seen in the figure, α is introduced where it is defined as the reduction factor in relation to the initial elastic modulus when considering the slip effect.

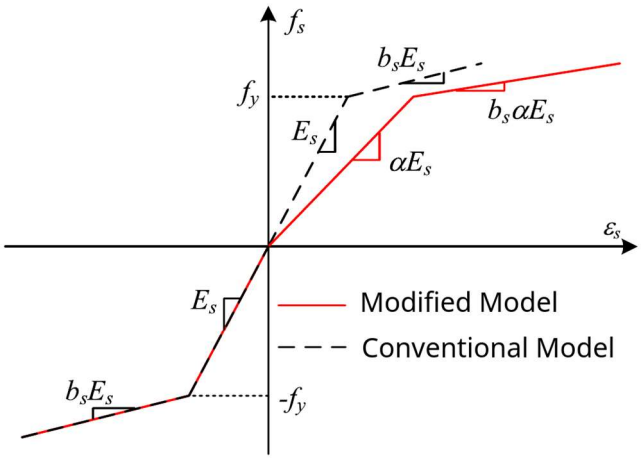


Fig. 2. Modified steel model to consider bar slip effect [15].

C. Zhao and Sritharan model

Various macroscopic model types have been proposed to account for the effects of reinforcement slip for simulating the behavior of RC elements. Zhao and Sritharan [16], utilizing experimental results of steel bars with sufficient embedment lengths, developed an empirical model for strain penetration induced reinforcement slip. As depicted in Fig. 3, Fiber Beam-Column Element (FBCEM) (Fig. 3.a) with a zero-length fiber section element was employed to simulate the column's rotation caused by bar slip. In this model the proposed steel model shown in Fig. 3.b is used for the reinforcement bar fibers where the slip at yield levels, S_y, is calculated from Equation 3. In this equation, f'_c and f_y are concrete and steel strengths in *MPa*, respectively, and d_b is the bar diameter in *mm.* Also, α is the parameter used in the local bond-slip relation and proposed as 0.4 in Zhao and Sritharan [16] study. Moreover, the ultimate slip seen in Fig. 3 adapted as $S_u = 40.S_y$, and the stiffness reduction factor, b, is accepted as *0.3* in this work.

$$S_y = 2.54\left(\frac{d_b f_y}{8437\sqrt{f'_c}}(2\alpha+1)\right)^{1/\alpha} + 0.34 \tag{3}$$

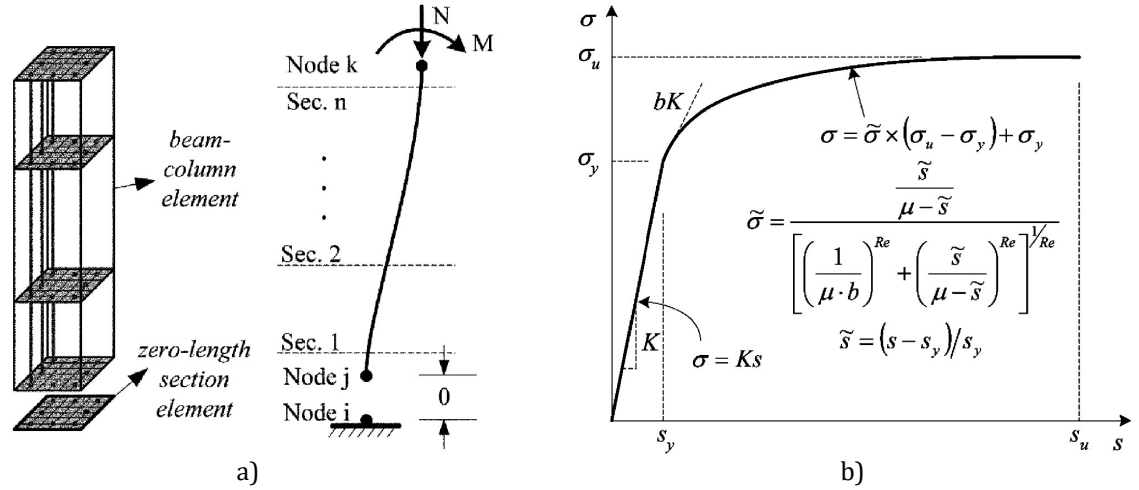


Fig. 3. Zero-length section element in fiber-based mode of strain penetration [16].

III. Experimentally Tested Columns

Two experimentally tested columns selected from previous studies to benchmark the slip models parameters in the context of the numerical model. The two RC columns are built using smooth bars for their steel reinforcement. Table 1 summarizes the main properties of the chosen columns, where *B* and *D* represent the cross-sectional dimensions and *H* is the height of the column. The two selected RC columns are from two different studies [17]-[18], and have varying axial load ratios (ALR) and concrete strengths (f_{co}), while the yield strength of steel (f_y) is comparable to smooth bars used in older buildings. Longitudinal (ρ_l) and transverse (ρ_h) steel ratios are also presented in the table.

Table 1. Properties of previously tested columns and selected as reference for this study

Column ID	*B* (*mm*)	*D* (*mm*)	*H* (*mm*)	Shear span ratio	f_{co} (*MPa*)	f_y (*MPa*)	ρ_l (%)	ρ_h (%)	ALR (%)
Q-0	250.0	250.0	1600.0	7.6	27.0	313.0	0.99	0.20	44.0
UN1	300.0	300.0	1500.0	6.0	18.9	330.0	1.00	0.22	20.0

The first column, Q-0 (Fig. 4.a), served as the reference column in Bousias et al. [18] work, where they explored the effectiveness of RC jacketing and fiber-reinforced polymer wrapping for seismic retrofitting, highlighting that lap splicing of smooth bars at floor level does not compromise deformation capacity. Their study emphasized that RC concrete jacketing significantly enhances force, deformation capacity, and energy dissipation. For the other column, UN1 (Fig. 4.b), Arani et al. [17] underscored the seismic importance of assessing old RC constructions with smooth bars, where they focused on evaluating the lateral response of

old RC columns. Test observations included crack development, drift, cover spalling, and analyses of base rotations and strain gauge results. The paper also provides equations for estimating base shear and rocking action.

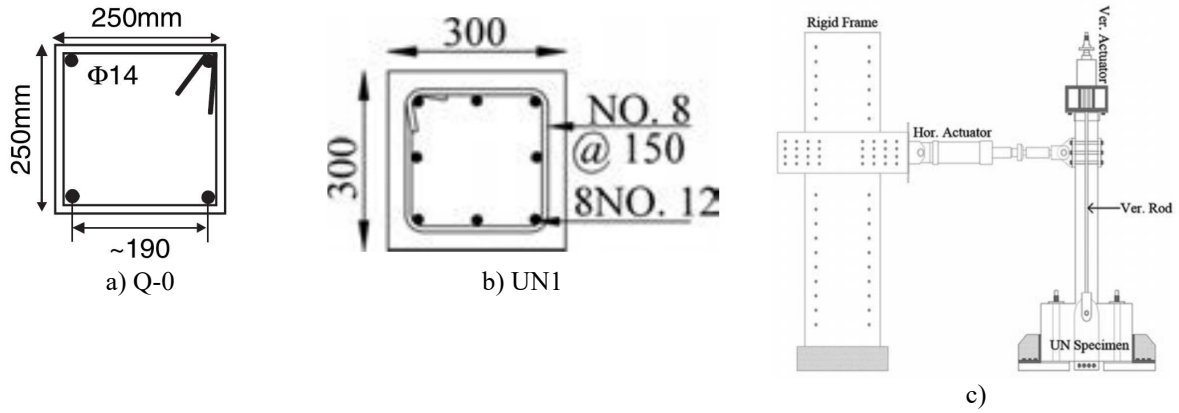


Fig. 4. Reference columns cross sections a) Bousias et al. [18], b) Arani et al. [17], and c) experimental configuration.

IV. OpenSees Numerical Model

To fulfill the purpose of this contribution, a numerical model is built utilizing the open source analysis platform OpenSees [8]. Macroscopic models, developed over OpenSees, such as those demonstrated by Kolozvari et al. [19], Olabi et al. [20], and Subasi et al. [21], has proven effective in replicating the responses of reinforced concrete (RC) elements like shear walls and columns. The macroscopic modeling approach offers simplicity and optimized computing power utilization. However, their successful application depends on precise constitutive laws that accurately represent material behaviors and the various anticipated nonlinear responses governing the overall performance of the concrete element. In this study, the Fiber Beam-Column Element Model (FBCEM) is employed to simulate the response of RC columns with smooth bars (Fig. 5). Stress-strain relationships adopted her for the materials to incorporate failures due to concrete crushing and reinforcing bar buckling.

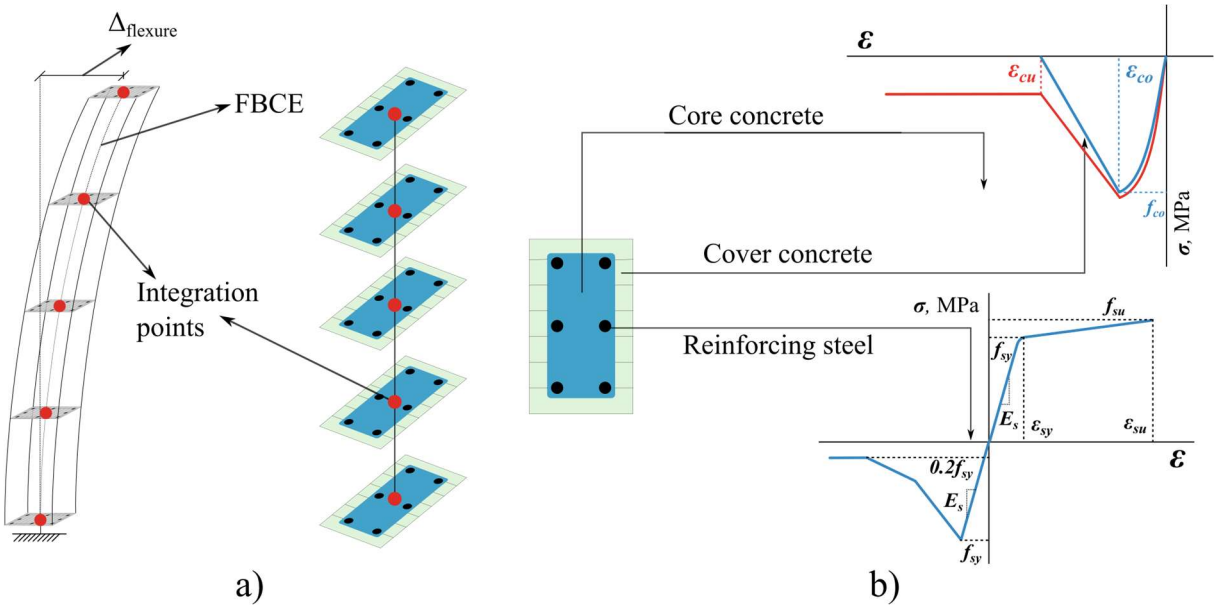


Fig. 5. a) Fiber Beam-Column Element Model using the *forceBeamColumn* , and b) Material Models assigned to fibers.

The total deformations of RC columns in the present numerical model are considered as the result of two main component; flexure and bar slip displacements. However, the will-known third component, shear displacement is disregarded in this work due to the higher shear span ratios of the tested column. For the flexure behavior, the *forceBeamColumn* element in used with five integration points in a *Lobatto*

configuration (Fig. 5.a), where each integration point assigns a fiber section. The cross section of the column is discretized into fibers representing the materials, as seen in Fig. 4.b. Assigned to concrete is the uniaxial material *Concrete02* based on Kent and Park [22], where the cover concrete reach zero stress values at the ultimate strain 0.006, the core concrete retains 20% of its peak stress at the ultimate strain. Additionally, steel fibers behavior is modeled using a simple bi-linear relationship for tension and the Dhakal and Maekawa [23] model for compression, which incorporates local bar buckling effects (Fig. 5.b).

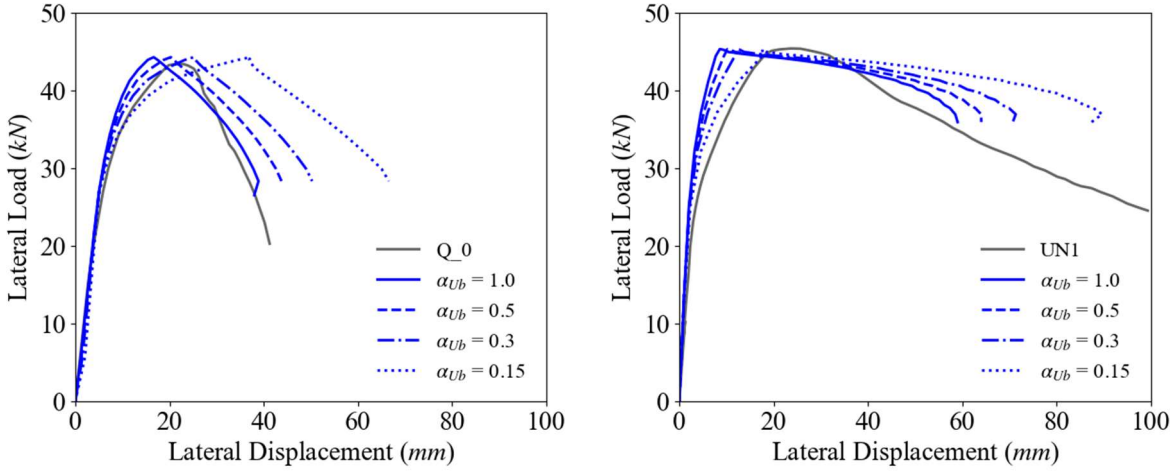
To account for slip displacement, three different modeling techniques are employed for each of the three analytical slip models discussed earlier. For the Sezen and Setzler Model, the slip displacement (Δ_s) is calculated at each analysis step of the numerical model using the equations mentioned in the relevant section III.A and added at each step to the flexure displacement resulted from OpenSees calculations. On the contrary, when using the Zhao and Sritharan model, the *zeroLengthSection* element is integrated into the numerical model, as seen in Fig. 3.a, where the steel fibers in this zero-length section are assigned with the steel model from Fig. 3.b, which accounts for bar slip. Finally, the reduction factor α introduced in the material modification model is applied to the tension part of the steel fibers in normal sections without adding any extra elements to the model, which is considered the simplest way to incorporate bar slip into the numerical model.

V. Parametric Evaluation

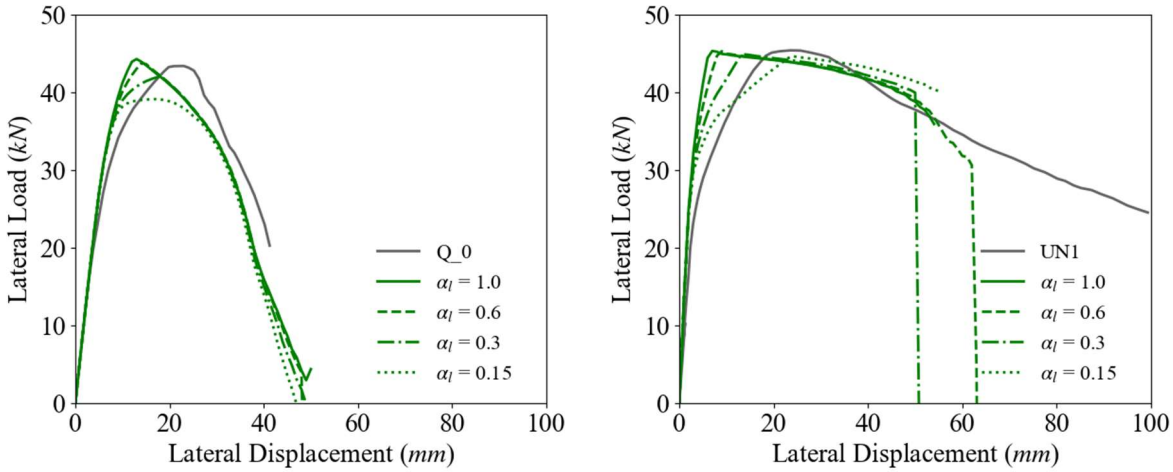
Successfully accomplishing the objectives of this study hinges on the careful selection and evaluation of key parameters within each slip model, and analyze their impact on the simulation capabilities of the numerical model when incorporating the respective bar slip model. In the slip equations proposed by Sezen and Setzler, all parameters directly relate to the cross section of the concrete column. However, the calculation of bond stress involves multiplying the square root of concrete compressive strength by a factor, which varies in literature. For this study, we focus on evaluating the factor determining elastic bond stress, denoted as α_{Ub}, with varying values, while the inelastic bond stress is assumed to be half of this value. For slip models where the stress-strain relationship of steel is modified to account for bar slip effects, the reduction factor which called α_l is used for evaluation. In the context of Zhao and Sritharan model, the parameter α plays a crucial role, particularly in calculating slip at yield levels, impacting the global stiffness of RC columns with smooth bars. This parameter, referred to as α_{sp} in this study, is considered a key factor in the overall performance of the slip model.

Fig. 6 presents a comprehensive overview of the results obtained from the numerical analysis employing each slip model, side by side with the experimental curves derived from the reference columns subjected to tests involving smooth bars. The evaluation involved assigning different values to the key parameters in each slip model to gauge their effectiveness in influencing the performance of the numerical model. Notably, these selected parameter values deviated from the ones initially proposed in the respective slip models. Particularly, in Sezen and Setzler model, substantial reductions in bond stress values were imperative to achieve alignment with the experimental curve. For instance, a value of $u_b = 0.3\sqrt{(f'_c)}$ proved to be the optimal fit for the column characterized by a higher axial load ratio, Q-0, while half of this value sufficed to adequately simulate the behavior of column UN1, which exhibited a lower axial load.

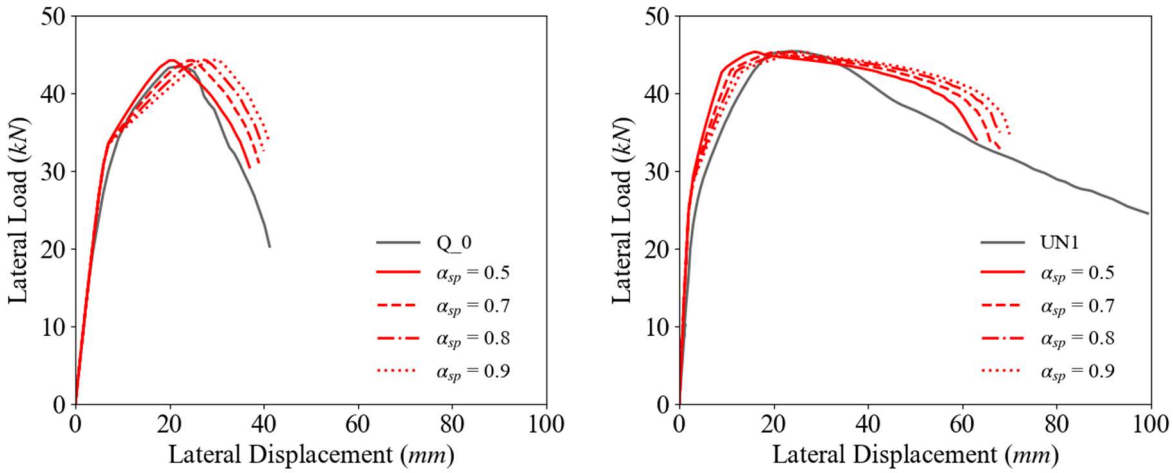
This observed trend was consistently replicated across the other two analytical models, underscoring the notable influence of axial load levels on the performance of the slip model. Such influence can be attributed to the phenomenon where lower bar slippage occurs under higher compressive forces, necessitating higher tensile forces at increased drifts to manifest slip behavior effectively. Additionally, the reduction factor required to modify the steel behavior stood at 0.3 for instances of higher axial loads and was reduced to 0.15 for the scenario involving lower axial load levels. However, despite these adjustments, the slip model predicated on modifying the stress-strain relationship of the steel did not yield highly accurate results in simulating the total response of the columns. Conversely, the slip model proposed by Zhao and Sritharan exhibited superior performance, effectively matching the experimental curve for both columns (Fig. 7). Nonetheless, it's worth noting that varying values were adapted to align with the experimental curves for the two columns, with a parameter α of 0.5 demonstrating the best simulation performance for column characterized by higher axial load ratios, Q-0, while a value of 0.9 exhibited excellent matching for UN1 with lower axial loads. The observation that $\alpha = 0.5$ closely aligns with the value (0.4) used in Zhao and Sritharan's study [16] with ribbed bars suggests that elevated axial loads mitigate the risk of smooth bar slip, bringing it closer to levels observed in ribbed bars. This phenomenon is attributed to the heightened compressive stress applied to smooth bars under high axial loads.



a) Sezen and Setzler model



b) Steel Model Modification



c) Zhao and Sritharan model

Fig. 6. Comparison of experimental curves with numerical simulations generated using bar slip models from a) Sezen and Setzler, b) modified steel relation, and c) Zhao and Sritharan, applied to the two referenced columns, Q-0 and UN1.

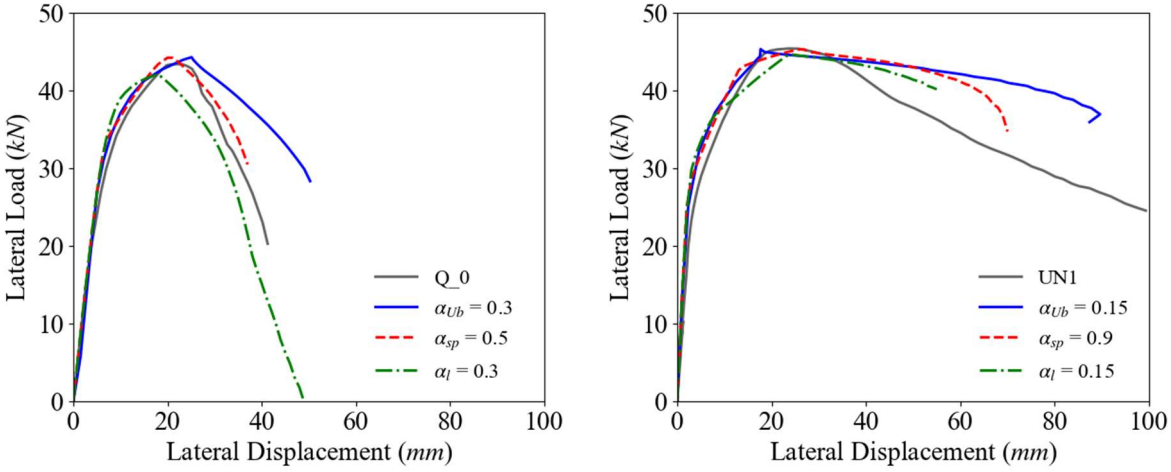


Fig. 7. Experimental vs numerical utilizing slip model

VI. CONCLUSION

In this study the performance of three analytical slip models for smooth bars in reinforced concrete columns is evaluated, highlighting the need for accurate modeling in seismic assessment of existing structures. Utilizing numerical simulations, the research investigates the influence of key parameters within these models, providing insights for improving their effectiveness in predicting the behavior of columns with smooth reinforcement. The following points could be concluded from this investigation:

- Existing slip models generally lack suitability for direct application to smooth bar columns, however, modification of these models has shown promising results in accurately simulating the behavior of smooth bar columns, suggesting avenues for improvement.
- As the results showed, direct modifications to the stress-strain relationship of steel reinforcement offer limited benefits in predicting the behavior of smooth bar columns, highlighting the need for further refinement.
- In the contrary, Zhao and Sritharan model exhibits superior simulation capabilities for smooth bars, particularly with adjusted α parameter, indicating its potential for enhanced accuracy.
- Refinement of bond stress values in Sezen and Setzler model, such as setting them at 0.3 for high axial loads and 0.15 for normal axial loads, could enhance predictive accuracy.
- Future research endeavors should prioritize the construction of a larger database of columns with smooth reinforcement to derive more precise parameters for slip models.
- The significant influence of axial load levels on model performance underscores the importance of correlating key parameters with axial loads for better predictions, which will be pivotal in enhancing the predictive accuracy of slip models for smooth bar columns.

REFERENCES

[1] H. Sezen, A. S. Whittaker, K. J. Elwood, and K. M. Mosalam, "Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey" *Engineering Structures*, vol. 25, no. 1, pp. 103–114, Jan. 2003, doi:10.1016/S0141-0296(02)00121-9.

[2] A. Demir et al., "Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023" *Bulletin of Earthquake Engineering*, Jan. 2024, doi:10.1007/s10518-024-01865-5.

[3] N. Caglar, I. Vural, O. Kirtel, A. Saribiyik, and Y. Sumer, "Structural damages observed in buildings after the January 24, 2020 Elazığ-Sivrice earthquake in Türkiye," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01886, Jul. 2023, doi:10.1016/j.cscm.2023.e01886.

[4] H. Sezen and J. P. Moehle, "Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement," *ACI Structural Journal*, vol. 103, no. 6, pp. 842–849, 2006, doi:10.14359/18236.

[5] E. A. Opabola, K. J. Elwood, and S. Oliver, "Deformation capacity of reinforced concrete columns with smooth reinforcement," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 2509–2532, May 2019, doi:10.1007/s10518-018-00540-w.

[6] G. M. Verderame, G. De Carlo, P. Ricci, and G. Fabbrocino, "Cyclic bond behaviour of plain bars. Part II: Analytical investigation," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 12, pp. 3512–3522, 2009, doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.07.001.

[7] G. Fabbrocino, G. M. Verderame, G. Manfredi, and E. Cosenza, "Structural models of critical regions in old-type R.C. frames with smooth rebars," *Engineering Structures*, vol. 26, no. 14, pp. 2137–2148, Dec. 2004, doi:10.1016/j.engstruct.2004.07.018.
[8] F. McKenna, M. H. Scott, and G. L. Fenves, "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 95–107, Jan. 2010, doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000002.
[9] M. N. Olabi et al., "Response of nonconforming RC shear walls with smooth bars under quasi-static cyclic loading," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 6683–6704, Jun. 2022, doi:10.1007/s10518-022-01451-7.
[10] R. Eligehausen, E. P. Popov, and V. V. Bertero, "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations," pp. 69–80, 1982.
[11] N. M. Hawkins, "Local bond strength of concrete for cyclic reversed loadings," *Bond in Concrete*, pp. 151–161, 1982.
[12] D. E. Lehman and J. P. Moehle, "Seismic performance of well-confined concrete bridge columns," Pacific Earthquake Engineering Research Center, Richmond, California, PEER Report 1998/01, 2000.
[13] J. M. Alsiwat and M. Saatcioglu, "Reinforcement anchorage slip under monotonic loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 9, pp. 2421–2438, 1992.
[14] H. Sezen and E. J. Setzler, "Reinforcement slip in reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, vol. 105, no. 3, pp. 280–289, 2008, doi:10.14359/19787.
[15] Z.-H. Wang, L. Li, Y.-X. Zhang, and S.-S. Zheng, "Reinforcement model considering slip effect," *Engineering Structures*, vol. 198, p. 109493, Nov. 2019, doi:10.1016/j.engstruct.2019.109493.
[16] J. Zhao and S. Sritharan, "Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures," *ACI Structural Journal*, vol. 104, no. 2, pp. 133–141, 2007, doi:10.14359/18525.
[17] K. K. Arani, M. Di Ludovico, M. S. Marefat, A. Prota, and G. Manfredi, "Lateral Response Evaluation of Old Type Reinforced Concrete Columns with Smooth Bars," *ACI Structural Journal*, vol. 111, no. 4, Jul. 2014, doi:10.14359/51686734.
[18] S. Bousias, A.-L. Spathis, and M. N. Fardis, "Seismic Retrofitting of Columns with Lap Spliced Smooth Bars Through FRP or Concrete Jackets," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 653–674, Oct. 2007, doi: 10.1080/13632460601125714.
[19] K. Kolozvari et al., "Comparative study on state-of-the-art macroscopic models for planar reinforced concrete walls," *ACI Structural Journal*, vol. 115, no. 6, pp. 1637–1657, 2018, doi: 10.14359/51710835.
[20] M. N. Olabi, N. Caglar, M. H. Kisa, and S. B. Yuksel, "Numerical study on the response of composite shear walls with steel sheets under cyclic loading," *Journal of Building Engineering*, vol. 34, p. 102069, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102069.
[21] I. Subasi, N. Caglar, M. N. Olabi, and H. Kasap, "Evaluation of the performance limit states in codes for RC columns under different axial loads," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 48, no. 10, pp. 13031–13045, Oct. 2023, doi:10.1007/s13369-023-07647-6.
[22] D. C. Kent and R. Park, "Flexural members with confined concrete," *Journal of the Structural Division*, vol. 97, no. 7, pp. 1961–1990, 1971.
[23] R. P. Dhakal and K. Maekawa, "Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement," *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 9, pp. 1139–1147, Sep. 2002, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:9(1139).

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Naive Bayes Kullanılarak Elektrikli Araç Menzil Tahminlemesi

Hasibe Berfu ÖZTÜRK[a], Pınar KIRAMANLIOĞLU [b]*

[a,b] İstanbul Beykent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: berfudemir@beykent.edu.tr

ÖZET

Elektrikli araçların kullanımı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır; bu durum, çevre dostu taşıma eğilimine işaret eden bir artış trendinin göstergesidir. Elektrikli araçlar, modern kültürde geniş bir şekilde kullanılmaktadır, bunun bir kısmı teknolojik gelişmeler ve çevresel sorunlara olan artan farkındalıktan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma elektrikli araçların elektrikle çalışan menzilini tahmin etmeye odaklanmaktadır. Bu araştırmanın temel amacı, tüketilen enerji temel alınarak elektrikli araçların menzilinin doğru tahminini mümkün kılacak bir model geliştirmektir. Bu hedefe ulaşmak için, elektrikli araç problemini bir tahmin problemi olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, Naive Bayes yöntemi kullanılmıştır. Naive Bayes, çoklu değişkenli verilerle başa çıkma konusundaki etkinliği ve verimliliği nedeniyle tahminde önemli bir yöntemdir. Bu çalışmada, Kaggle platformundan alınan elektrikli araç nüfusu veri kümesi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen metodolojinin elektrikli araçların elektrik tüketimini başarılı bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir. Önerilen yöntemin etkinliği, diğer makine öğrenimi yöntemi olan Destek Vektör Makinesi ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Son olarak, elektrikli araçların kullanımı için stratejik planlama açısından önem arz ettiği düşünülen sonuçlar, kullanılan ülkeler ve elektrikli araç modelleri temelinde tahminler ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Elektrikli Araç, Makine Öğrenmesi, Naive Bayes, Tahminleme*

Prediction of Electric Vehicle Range Using Naive Bayes

ABSTRACT

The use of electric vehicles have increased significantly in recent years, which is indicative of a rising trend towards environmentally friendly transportation. Electric vehicles are widely used in modern culture, partly due to technological developments and growing awareness of environmental issues. Therefore, this study focuses on estimating the electric range by electric vehicles. The main aim of this research is to develop a model that allows accurate prediction of electric vehicles on the basis of consumed energy. To achieve this objective, electric vehicle problem is addressed as a prediction problem. In this context, a Naive Bayes methodology has been developed. Naive Bayes is important for prediction due to its efficiency, and effectiveness in handling data with multiple variables. In this study, electric vehicle population dataset taken from Kaggle platform was applied. Experimental results show that the proposed methodology achieves successful results in estimating the electricity consumption of electric vehicles. The effectiveness of the proposed method has been shown in comparisons with Support Vector Machine. Finally, the results, which are thought to be important for strategic planning for the use of electric vehicles, are presented with predictions based on the countries and electric vehicle models *used.*

Keywords: *Electric Vehicle, Machine Learning, Naive Bayes, Support Vector Machine, Prediction*

I. INTRODUCTION

Electrical vehicles (EVs) are growing in popularity as a result of the need to address population health issues and the catastrophic climate change brought on by rising greenhouse gas emissions [5]. With the goal of assisting in the creation of low-carbon societies and lowering exhaust emissions, governments and municipalities around the world are starting to encourage the adoption of electric cars [7]. Due to its advantages for the environment, demand for and manufacturing of electric cars (EVs) are rising [6]. Unfortunately there are some issues about electrical vehicles. One of the major problems is range anxiety. Range anxiety refers to the fear or concern that an electric vehicle's battery will run out of charge before reaching its destination or before finding a charging station, leaving the driver stranded.Limited range, charging infrastructure, charging time, battery degradation are some factors contribute to range anxiety[10]. Addressing range anxiety is crucial for accelerating the adoption of electric vehicles[11]. Efforts to expand charging infrastructure, improve battery technology, increase public awareness, and develop better range prediction algorithms can all help alleviate range anxiety and boost confidence in electric vehicle ownership[8]. Additionally, educating consumers about the actual driving range of electric vehicles under various conditions and promoting the benefits of electric mobility can help dispel misconceptions and reduce anxiety about making the switch to electric vehicles[9]. Considering these perspectives, the aim of this study is to develop a model that will enable accurate estimation of the range of electric vehicles. For this reason, in order to articulate the aim of the study among the variables present in the dataset, "electric vehicle type, electric range, legislative district" variables were selected. Subsequently, with the assistance of Python, first a Naive Bayes(NB) model and then a Support Vector Machine Method(SVM) were established separately. Thus, the results of the two models were subjected to comparison, including accuracy rate among other metrics.

The structure of this paper is as follows: Section 2 presents the material and method. Section 3 presents the experimental results. Finally, in Section 4 and Section 5, the conclusions are discussed, along with suggestions for future research.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Naive Bayesian

The Naive Bayes algorithm is a basic learning method that applies the Bayes rule and makes the strong assumption that, given the class, the attributes are conditionally independent [1].

Based on Bayes' rule, Naive Bayes is a type of Bayesian Network Classifier. With regard to attribute-value data, this presumption grants;

$$P(y \mid \mathbf{x}) = P(y)P(\mathbf{x} \mid y)/P(\mathbf{x}) \qquad (1)$$

where n is the number of attributes and x_i is the value of the ith attribute in x.

$$P(\mathbf{x} \mid y) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i \mid y) \qquad (2)$$

where c_i is the ith class and $\boldsymbol{k}$ is the number of classes. Therefore, by normalizing the numerators on the right side of the equation, (1), (2) and (3) can be computed.

$$P(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{k} P(c_i)P(\mathbf{x} \mid c_i) \qquad (3)$$

The Pseudocode is shown in Figure 1.

```
# Separating independent variables (X) and dependent variable (y)
X = data[['Electric Vehicle Type', 'Electric Range', 'Legislative District']]
y = data['Electric Vehicle Type']
data_encoded = pd.get_dummies(data, columns=['Electric Vehicle Type'])

# Splitting into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Creating Naive Bayes model
model = MultinomialNB()

# Training the model
model.fit(X_train, y_train)

# Making predictions on the test set
y_pred = model.predict(X_test)

# Evaluating the model's performance
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
classification_report_result = classification_report(y_test, y_pred)

print("Model Accuracy:", accuracy)
print("\nClassification Report:\n", classification_report_result)
```

Figure 1. Pseudocode for Naive Bayes

B. Support Vector Machine

A potent, cutting-edge algorithm with solid theoretical underpinnings based on the Vapnik-Chervonenkis theory is Support Vector Machines (SVM). The term "regularization" describes how the model is applied to fresh data. Specifically, support vector machines were created as a technique to address classification issues in supervised learning [2].

SVM is a brand-new machine learning technique built by Vapnik [8] that is based on statistic learning theory. It is categorized as a computational approach. SVM can obtain decision-making rules and accomplish minimal error for independent tests set based on the structural risk minimization (SRM) principle, which enables it to effectively address learning challenges. [3].

SVM produces classifications with a relatively high accuracy and SVM can classify the data linearly or nonlinearly [4].

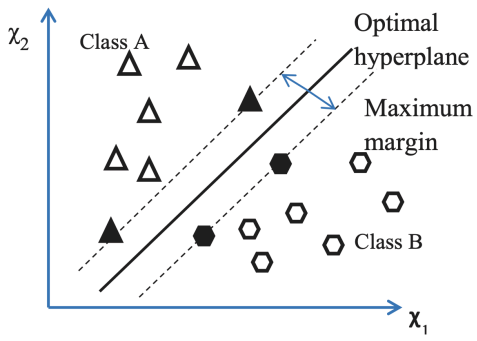


Figure 2. Basic idea of SVM [4]

The Pseudocode is shown in Figure 3.

```
# Perform one-hot encoding on categorical variables
data_encoded = pd.get_dummies(data, columns=['Electric Vehicle Type'])

# Separate independent variables (X) and dependent variable (y)
X = data[['Electric Vehicle Type', 'Electric Range', 'Legislative District']]
y = data['Electric Vehicle Type']
data_encoded = pd.get_dummies(data, columns=['Electric Vehicle Type'])

# Split the data into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Create Support Vector Machines (SVM) model
model = SVC(random_state=42)

# Train the model
model.fit(X_train, y_train)

# Make predictions on the test set
y_pred = model.predict(X_test)

# Evaluate the model's performance
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
classification_report_result = classification_report(y_test, y_pred)

print("Model Accuracy:", accuracy)
print("\nClassification Report:\n", classification_report_result)
```

Figure 3. Pseudocode for Support Vector Machine

III. RESULTS

The comparative results table for the specified two methods is provided in Table 1. In this study,

Tablo 1. Comparative Results

	Naive Bayesian	**Vector Support Machine**
Model Accuracy	0.5973	0.9903
Precision for class 0	0.31	1
Precision for class 1	0.85	0.99
Recall for class 0	0.64	0.96
Recall for class 1	0.58	1
F1-Score for Class 0	0.42	0.98
F1-Score for Class 1	0.69	0.99

Based on the provided metrics comparing Naive Bayesian and Vector Support Machine (VSM) models, the following observations can be made:

The VSM model significantly outperforms the Naive Bayesian model in terms of accuracy, achieving an accuracy of 99.03% compared to 59.73%. This indicates that the VSM model makes more accurate predictions overall. Precision measures the proportion of correctly predicted positive cases out of all cases predicted as positive. The VSM model exhibits higher precision values for both classes compared to the

Naive Bayesian model. Particularly for class 0, the precision of the VSM model is close to 1 (100%) while the Naive Bayesian model's precision is only 31%. For class 1, both models have relatively high precision values (85% and 99% for Naive Bayesian and VSM models, respectively). Recall measures the proportion of correctly predicted positive cases out of all actual positive cases. Similar to precision, the VSM model shows higher recall values for both classes compared to the Naive Bayesian model. The recall for class 0 is notably higher for the VSM model (96% compared to 64% for Naive Bayesian), indicating that the VSM model is better at capturing true positive cases. For class 1, both models have high recall values (58% and 100% for Naive Bayesian and VSM models, respectively). The F1-score is the harmonic mean of precision and recall and provides a balance between the two metrics. The VSM model achieves higher F1-scores for both classes compared to the Naive Bayesian model, indicating better overall performance in terms of precision and recall balance.

IV. CONCLUSIONS

Compared to Naive Bayes, SVM is a more complicated model that may have been better at capturing complex patterns in the data. Despite the SVM model's excellent accuracy of 0.99 on the test dataset, more validation is necessary to evaluate its generalization capability. Methods such as cross-validation can be used for this purpose. More information on the model's practicality would also come from analyzing its performance on a dataset that is entirely different from the one being used. SVM and Naive Bayes both have their drawbacks. The feature independence assumption made by Naive Bayes may not hold true for all datasets. The selection of the kernel function and hyperparameters can have an impact on SVM's performance; also, because of its computational complexity, SVM may perform poorly on huge datasets. Furthermore, if the training data is biased or not representative of the population, both models may show biases.

Since the Naive Bayes method assumes feature independence and is a suitable probabilistic classifier for certain sorts of data distributions, it was chosen for the initial attempt. It is especially effective with smaller datasets. On the other hand, the SVM method—which is well-known for its proficiency in handling high-dimensional data and non-linear relationships—was selected for the second strategy. Standard preprocessing operations were carried out on the dataset, including encoding categorical variables, scaling numerical features when appropriate, and addressing missing values. To provide a precise assessment of the model's performance, the dataset was painstakingly divided into training and testing subsets. To gain a deeper understanding of each model's performance characteristics, additional measures such as precision, recall, and F1-score were employed in the evaluation process. The underlying distributions of the dataset, the intricacy of the interactions between characteristics and the target variable, and the presumptions made by each model are a few possible explanations for the disparity in accuracies.

V. DISCUSSION

Naive Bayes and Support Vector Machine has been used to estimate the range of electrical vehicles. The utilization of Naive Bayes and Support Vector Machine (SVM) algorithms for estimating the range of electric vehicles (EVs) presents an interesting avenue for research in the field of electric mobility. The observation that SVM outperforms Naive Bayes in terms of range estimation highlights the potential benefits of employing more complex and sophisticated machine learning models for this task. However, it also suggests the need for further exploration and experimentation with alternative models and datasets to validate and reinforce these findings. In the future, researchers could consider experimenting with a variety of other machine learning algorithms beyond Naive Bayes and SVM to further enhance the accuracy and robustness of EV range estimation models. Additionally, exploring different datasets representing diverse driving conditions, geographical locations, vehicle types, and environmental factors can offer insights into the generalizability and robustness of EV range estimation models. Incorporating real-world data from EVs equipped with telematics systems or onboard sensors could provide valuable information for model training and validation. By investigating alternative models and datasets, researchers can gain a deeper understanding of the factors influencing EV range and develop more accurate and reliable range estimation models, ultimately contributing to the advancement of electric mobility technologies.

REFERENCE

[1] Webb, G. I., Keogh, E., & Miikkulainen, R. (2010). Naïve Bayes. Encyclopedia of machine learning, 15(1), 713-714.

[2] Bhavsar, H., & Panchal, M. H. (2012). A review on support vector machine for data classification. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), 1(10), 185-189.

[3] Deris, A. M., Zain, A. M., & Sallehuddin, R. (2011). Overview of support vector machine in modeling machining performances. Procedia Engineering, 24, 308-312.
[4] Bahari, N. I. S., Ahmad, A., & Aboobaider, B. M. (2014, June). Application of support vector machine for classification of multispectral data. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 20, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
[5] Lemian, D., & Bode, F. (2022). Battery-supercapacitor energy storage systems for electrical vehicles: a review. *Energies*, *15*(15), 5683.
[6] Xiao, Y., Zhang, Y., Kaku, I., Kang, R., & Pan, X. (2021). Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, 111567.
[7] Fukushima, A., Yano, T., Imahara, S., Aisu, H., Shimokawa, Y., & Shibata, Y. (2018). Prediction of energy consumption for new electric vehicle models by machine learning. IET Intelligent Transport Systems, 12(9), 1174-1180.
[8] Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Eléctrica A Prognostic Decision-Making Approach Under Uncertainty For An Electric Vehicle Fleet Routing Problem. (N.D.).
[9] Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. Applied Sciences (Switzerland), 13(10). https://doi.org/10.3390/app13106016
[10] Rainieri, G., Buizza, C., & Ghilardi, A. (2023). The psychological, human factors and socio-technical contribution: A systematic review towards range anxiety of battery electric vehicles' drivers. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 99, 52–70. https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.001
[11] Noel, L., Zarazua de Rubens, G., Sovacool, B. K., & Kester, J. (2019). Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety. Energy Research and Social Science, 48, 96–107. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.10.001

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

TBF Çeliğinin Hot Stamping Yöntemi ile Üretimi: İzotermal Tutma ve Mikroyapısal Karakterizasyon

Mustafa Uzunboy[a], Ersoy Erişir[a], Oğuz Gürkan Bilir[a]*

[a]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
* **mustafauzunboy07@gmail.com**

ÖZET

Hot stamping, yüksek dayanım gerektiren bileşenlerin üretiminde otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik (AHSS) türlerinden biri olan dönüşüm kaynaklı plastisite destekli beynitik ferrit (TBF) çeliklerinin hot stamping yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. C-Mn-Si-Nb içeren çelik, laboratuvar ölçeğinde döküm yöntemiyle üretilmiştir. Döküm sonrasında sıcak ve soğuk haddeleme işlemleri ile plakalar elde edilmiştir. Soğuk haddelenmiş plakalara hot stamping işlemi uygulanmıştır. TBF çelik yapısı oluşturmak amacıyla hot stamping sırasında çelik iki aşamalı ısıl işlem çevrimine tabi tutulmuştur. Soğuk haddelenmiş plakalar ilk olarak östenitleme sıcaklığında tutulmuş ve ardından hot stamping kalıbında Ms sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa soğutularak izotermal tavlama işlemi uygulanmıştır. Hot stamping uygulanmış numuneler metalografik prosedüre uygun olarak hazırlanmış ve ışık mikroskobu kullanılarak mikroyapısal karakterizasyona tabi tutulmuştur. Mikroyapısal karakterizasyondan elde edilen sonuçlar, beynitik ferrit, kalıntı östenit (RA) ve martenzitik/östenit (M/A) fazlarını içeren çok fazlı bir mikroyapının elde edildiğini göstermiştir. Çekme testi uygulanan numunelerde, ortalama olarak 1350 MPa mukavemet ve %13 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *TBF çeliği, hot stamping, faz dönüşümleri, mikroyapı, mekanik özellikler*

Production of TBF Steel by Hot Stamping Method: Isothermal Annealing and Microstructural Characterization

ABSTRACT

Hot stamping is a method frequently used in the automotive industry for the production of high strength components. In the study, one of the types of advanced high-strength steel (AHSS) transformation-induced plasticity assisted bainitic ferrite (TBF) steels was studied by hot stamping method. The steel containing C-Mn-Si-Nb was produced using laboratory scale casting. After the casting, plates were obtained by hot and cold rolling processes. To obtain TBF steel microstructure, hot stamping was applied to the cold rolled plates via a two-stage thermal cycle. The cold rolled plates were first held at austenitizing temperature and then cooled to a temperature above Ms in the hot stamping die to apply isothermal annealing. The hot stamped samples were prepared according to the metallographic procedure and subjected to microstructural characterization using light microscope. The microstructural characterization showed that a multiphase microstructure consisting of bainitic ferrite, retained austenite (RA) and martensite/austenite (M/A) constituents was obtained. According to the results of tensile testing, the average values of 1350 MPa strength and 13% elongation were obtained.

Keywords: *TBF steel, hot stamping, phase transformations, microstructure, mechanical properties*

I. GİRİŞ

Gelecekteki otomobil teknolojileri, araçları daha sürdürülebilir, güvenli, enerji verimli ve çevreye daha az zararlı hale getirmek amacıyla yeni enerji kaynakları ve malzemelerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Otomotiv üreticileri, elektrikli araçların menzilini artırmak için özellikle gövde ve şasi parçalarında ağırlık azaltma stratejilerine çalışılmaktadır. Bunun nedeni, içten yanmalı motora sahip araçlara göre elektrikli araçlarda özellikle bataryanın oluşturduğu daha büyük kütledir [1], [2]. Bu doğrultuda yapılan araştırmalar, diğer hafif malzemelere alternatif olarak beyaz gövde (body in white; BIW) bileşenleri için geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklere (advanced high strength steels; AHSS) üzerinde yoğunlaşılmıştır. Hot stamping teknolojisi, AHSS bileşenlerinin üretimi için sıcak sac şekillendirme metodu olarak geliştirilmiştir. Böylelikle, geleneksel soğuk şekillendirme teknolojilerinde karşılaşılan düşük şekillendirilebilirlik ve yüksek geri yaylanma eğilimi gibi eksiklikleri gidermektedir [3]-[6]. Hot stamping prosesinde, östenitleme sıcaklığına ısıtılan parça şekillendirmek üzere pres bölgesine taşınır ve kalıp içerisine yerleştirilir. Su soğutma kanalları bulunan kalıp içerisinde parça hem şekillendirilmektedir hem de hızlı soğumaya tabi tutulmaktadır. Hızlı soğuma ile birlikte mikroyapıda martenzit oluşumu sağlanır [7]-[9]. Geleneksel anlamda en yaygın olarak kullanılan hot stamping malzemeleri 22MnB5 ve benzer alaşım bileşenlerine sahip çelik türleridir. 22MnB5 çeliğinde tamamen martenzitik yapı oluşması için su soğutmalı kalıpta en düşük 27 K/sn soğuma hızına ulaşılması gerekmektedir. Martenzit mikroyapının bir sonucu olarak 1300 MPa çekme dayanımı ve %6-8 toplam uzama tipik değerler olarak elde edilebilmektedir [10], [11].

Hot stamping konusundaki güncel çalışmalar incelendiğinde tam martenzitik çelikler yerine çok fazlı mikroyapıların oluşturulması ele alınmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde yeni teknikler kullanılarak maliyet tasarrufu, verim artığı ve mekanik özelliklerde artış sağlanmıştır [11]. Çalışmanın konusu olan dönüşüm kaynaklı plastisite destekli beynitik ferrit (TBF) çelikler 3. nesil AHSS içerisinde yer almaktadır. Yüksek mukavemet ve süneklilik kombinasyonu elde edilebilen 3. Nesil AHSS yaklaşımları hot stamping yöntemi ile eş zamanlı olarak son yıllarda önem kazanmıştır. TBF çeliklerinin tipik ısıl işleminde tamamen östenitleme gerçekleşmesi için A3 sıcaklığının üzerinde bir bekleme yapılır. Östenitleme işlemini ardından Bs ve Ms sıcaklıkları aralığında izotermal tutma gerçekleştirilir. Böylelikle karbürsüz beynit ile birlikte kalıntı östenit eş zamanlı olarak oluşması sağlanır Son bir su verme işlemi ile birlikte mikroyapıda martenzit/ östenit (M/A) adaları da oluşabilir [12]-[15].

Hot stamping işlemiyle çok fazlı mikroyapıda parça üretmek günümüz araştırmacıların ilgi kaynağı olmuştur. Taylor ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada TBF çeliğinin hot stamping yöntemi ile üretimi incelemişlerdir. 20MnSiAlPB5 çelik alaşımında hot stamping sonrası beynitik ferrit, martenzit ve kalıntı östenit içeren çok fazlı mikroyapı elde etmişlerdir. Geleneksel bir TBF çeliğinin soğuk şekillendirilmesi sonrasında parçanın yüksek deformasyona maruz kalan bölgelerinde kalıntı östenit miktarı %9.1'den %3.3'e gerilemiştir. Oysaki geliştirilen yöntem ile kalıntı östenit miktarı % 9.1 olmuştur. Bu sayede parçanın çarpışma sırasında enerji sönümlemesi % 22 arttırılmıştır [16]. Bir diğer 3. nesil AHSS kategorisinde olan su verme ve paylaştırma (Q&P) çeliği, TBF çeliğinde farklı olarak Ms sıcaklığının altına inilip daha sonra üzerine çıkılarak paylaştırma (partitioning) işlemi ile devam etmektedir. Böylelikle karbonu kalıntı östenite paylaştırmak ve bu fazın oda sıcaklığına kadar stabil olarak kalmasını sağlamak amaçlanmıştır. Liu ve arkadaşları Q&P prosesini hot stamping yöntemine entegre etmişlerdir. Geleneksel bor çeliğinin uzama miktarının arttırılması hedeflenmiştir. 0.22C-1.58Mn-0.81Si kimyasal kompozisyona sahip çelikte Q&P işlemi sonucunda toplam uzama %6.6'dan %14.8'e yükselmiştir [17]-[18].

Bu çalışmada C-Mn-Si-Nb elementleri içeren çeliğin, TBF çeliklerinde kullanılan ısıl çevrimin uyarlandığı bir hot stamping ile parça üretimi yöntemi geliştirilmesi araştırılmıştır. Anizotermal tavlama sonrasında elde edilen çok fazlı mikroyapı ile 1200 MPa'dan daha yüksek mukavemet ve %10'dan daha yüksek toplam uzama elde edilmiştir.

II. MATERYAL METOT

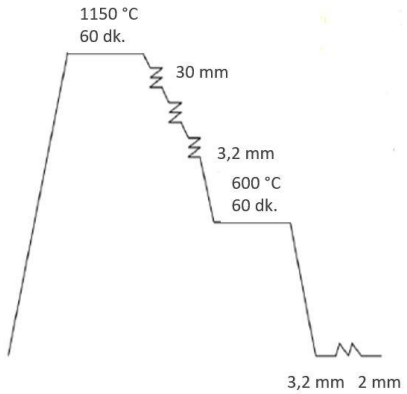
A. Malzeme

TBF çelik alaşımlarından yapılan literatür taraması sonrasında alaşım belirlenmiştir. Bu alaşımda C, Si, Mn ve Cr temel elementler olup Nb, Ti, Mo ve B gibi elementlerin oranları Tablo 1'de verildiği şekilde oluşturulmuştur. ThermoCalc yazılımı ile gerçekleştirilen hesaplama sonuçları kullanılarak A3, A1 ve Ms gibi kritik sıcaklıklar ön görülmüştür.

Tablo 1. Deneysel TBF çeliği alaşımı

C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	Nb	Ti	B, ppm
0.18	1.57	1.63	0.01	0.02	0.03	0.89	0.060	0.007	0.041	0.051	0.002	20

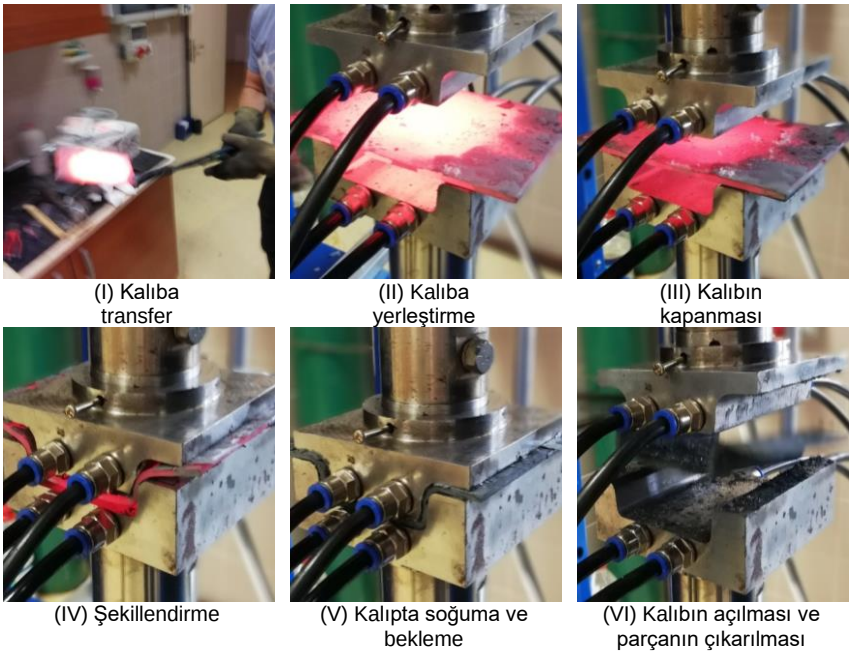
Döküm sonrasında ingot, homojenizasyon amacıyla 1200 °C'de 1 saat östenitlemeye tabi tutulmuş ve sonrasında fırında 0,3 K/sn hızla soğutulmuştur. Sıcak ve soğuk haddeleme deney planı Şekil 1'de verilmiştir. Sıcak haddeleme öncesi ingotun yüzeyi temizlenmiştir. Sıcak haddelemede ingotlar 1150 °C'de 1 saat östenitleme sonrası 28 mm kalınlıktan 3.2 mm kalınlığa indirilmiştir. Tek yönde çalışan ikili merdaneye sahip bir haddeleme simülatöründe sıcaklığın 900 ºC'ye düşmesi durumunda tekrar 1150 °C'de östenitleme yapılarak deformasyon adımları tamamlanmıştır. Sıcak haddelemedeki sarma benzeri 600 ºC'de 60 dakika tutma işleminden sonra havada soğutulmuştur. Sıcak haddeleme sonrası tufal giderme uygulanan plakalar soğuk haddelemeye tabi tutulmuştur.



Şekil. 1 Sıcak ve soğuk haddeleme deney planı

B. Pres ve Prototip Kalıp

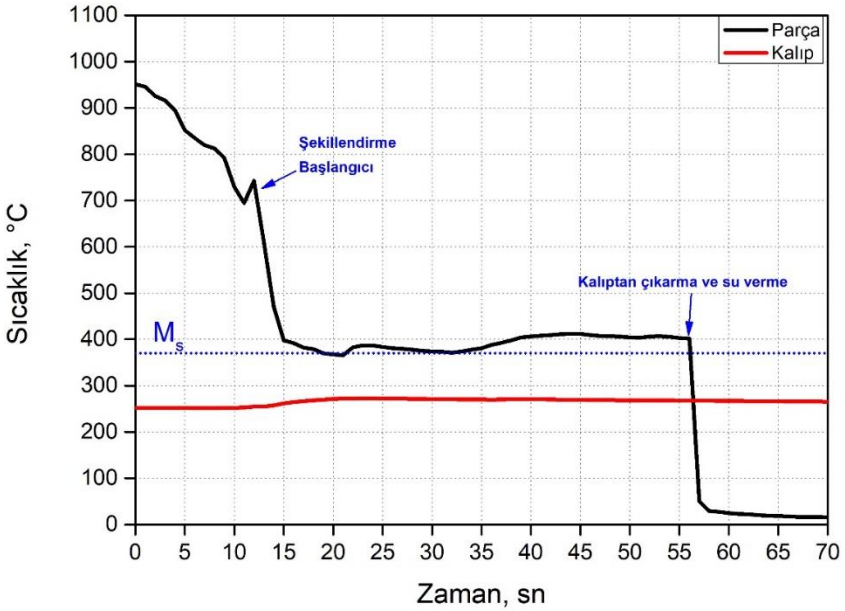
Prototip kalıpta sıcak haddelenmiş plakalarda (100*90*2 mm^3) ile öncelikli olarak TBF prosesine uygun hot stamping denemeleri yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda hot stamping prosesi optimize edilmeye çalışılmıştır. Proses Şekil 2'de görüldüğü gibi (I) kalıba transfer, (II) kalıba yerleştirme, (III) kalıbın kapanması, (IV) şekillendirme, (V) kalıpta soğuma/bekleme ve (VI) kalıbın açılması/parçanın çıkarılması aşamalarından oluşmaktadır. Ön ısıtılmış kalıp ve prototip parçanın sıcaklığı proses uygulanırken K tipi termoeleman ile ölçülmüştür. TBF çeliğinin hot stamping prosesi ile üretimi için östenitleme sonrası fırından kalıba taşınması sırasında sıcaklığının düşmesi nedeniyle 950 °C sıcaklığının uygun olacağına karar verilmiştir. Östenitleme işlemi 5 dakika boyunca gerçekleştirmiştir.



Şekil. 2 Prototip hot stamping yönteminin aşamaları

C. TBF Çeliğine Hot Stamping Yöntemi

Şekil 3' de hot stamping uygulanan parçanın sıcaklık-zaman grafiğini gösterilmiştir. Östenitlemeden sonra parça, 5-10 saniye içerisinde önceden ısıtılmış kalıba transfer edilmiştir. Sıcak parça kalıbın kapanması ile şekillendirilmiş ve anizotermal tutma süreci başlamıştır. 30 saniye boyunca yaklaşık 390-400 °C sıcaklıkta izotermal tavlama işleminden sonra 65 K/sn hızında soğutulmuştur. Böylece parçada mikroyapısal olarak beynit, martenzit ve kalıntı östenit içermesi hedeflenmiştir. Termoeleman bağlanan kalıp sıcaklığı da 260-270 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil. 3 Hot stamping uygulanan parçanın sıcaklık-zaman grafiği

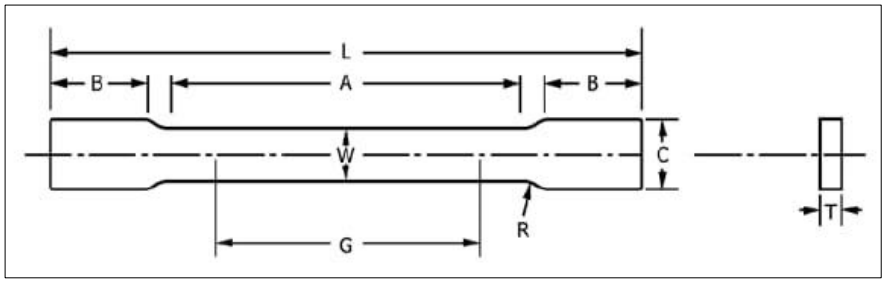
D. Mikroyapısal Karakterizasyon ve Mekanik Testler

Prototip parçanın üretimi sonrasında mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Metalografik olarak numuneye sırasıyla 120, 320, 600, 1000, 2000 mesh numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve sonrasında 3 μm elmas solüsyon ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış konumdaki numuneler etkin bir faz karakterizasyonu için farklı dağlayıcılar kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Östenitleme ve izotermal bekleme işlemlerinden sonra numuneye ışık mikroskobu incelemeleri için %6 Nital ile 5-15 sn arasında ve Klemm I dağlayıcısı ile 1-5 dk arasında dağlanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri için metalografik olarak hazırlanan numuneler %3 Nital ile 5-15 sn arasında dağlanmıştır. Işık mikroskobu (LM) incelemeleri OLYMPUS BX41M-LED model ışık mikroskobuyla ve SEM incelemeleri JEOL JSM-6060 model taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır.

Prototip Üretim çalışmaları sonrası metalografik olarak hazırlanan ve mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilen numunede Zeiss Vickers sertlik ölçüm cihazında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış konumdaki numunelere uygulanan sertlik ölçümleri 10 kgf yük altında yapılmış ve her numuneden 5 ölçüm alınarak her numuneye ait ortalama sertlik değeri ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Prototip Üretim çalışmaları sonrasında plakadan hazırlanan çekme numunelerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Pilot ölçekte hot stamping ile elde edilen TBF çeliğine ait sacda çekme testleri INSTRON 300LXJ9626 statik hidrolik üniversal test cihazında uygulanmıştır. Çekme testi sonrasında malzemelerin çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Çekme test numuneleri testi EN ISO 6892-1:2009 standardına göre subsized olarak hazırlanmıştır. Şekil 3'te çekme testi numunesinin şematik gösterimi verilmiştir.

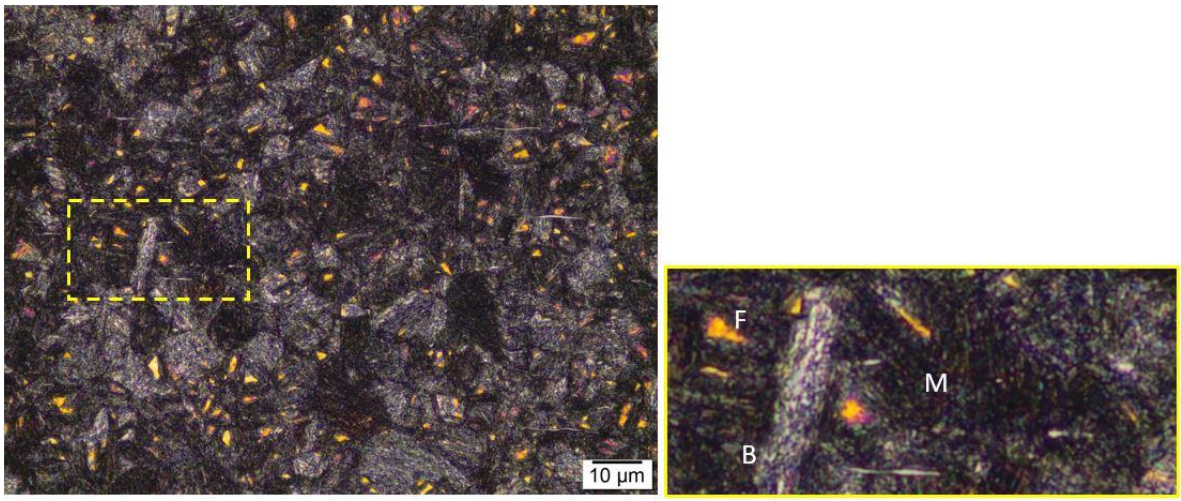


Şekil. 3 Çekme testi için hazırlanan numune boyutları; R:6mm; A:32mm; B:32mm; C:10mm; L:100mm; W: 6,3 mm, T:2mm [19]

III. SONUÇLAR

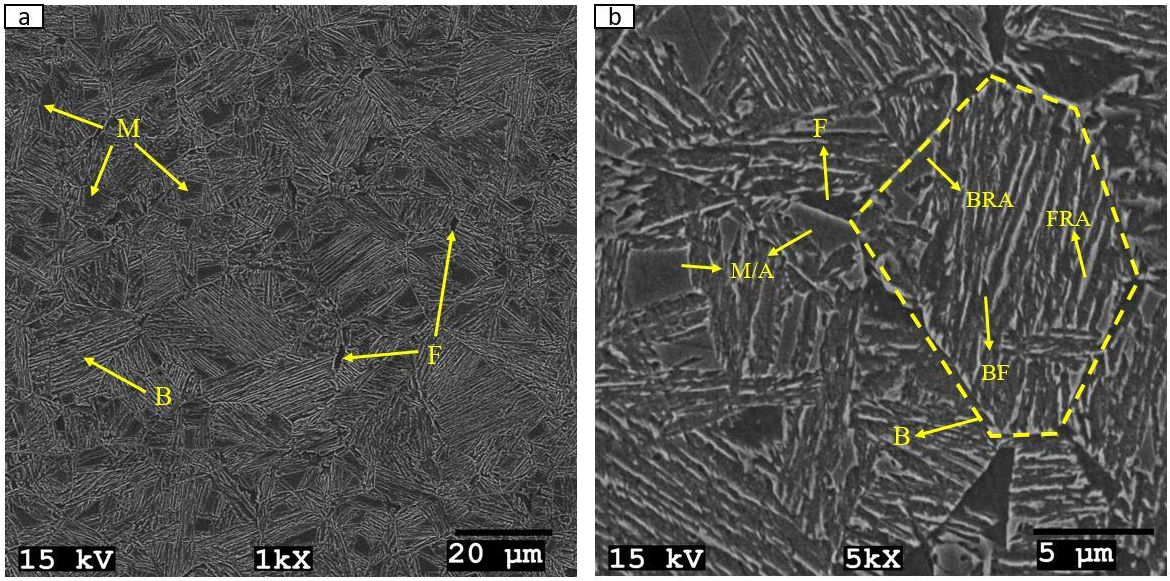
A. Mikroyapısal Karakterizasyon

Üretilen prototip TBF çeliği ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu ile malzeme karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4'te bu çalışmaya ait ışık mikroskobu görüntüleri sunulmuştur. Nital-Klemm ile dağlama sonrası genel olarak beynitik-martenzitik bir yapı içerisine dağılmış ferrit gözlenmektedir. Klemm dağlayıcısının getirdiği renkli dağlama etkisi sonucunda oluşan sarı renkli yörelerde ferrit fazı olarak daha kolay ayırt edilebilmektedir. Ancak, ışık mikroskobu için yapılar oldukça ince olduğundan beynitik ve martenzitik yöreler arasında kısmen ayrım yapılabilmektedir.



Şekil. 4 Prototip TBF çeliğine ait ışık mikroskobu görüntüleri (F: ferrit, B: beynit, M: martenzit)

TBF çeliğinin SEM inceleme görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Mikroyapı incelendiğinde genel olarak yapının Şekil 5a'daki gibi beynitik (B)-martenzitik (M) olduğu ve düşük bir miktar ferritin (F) içerdiği görülmektedir. Beynit fazının (B) beynitik ferrit (BF), filmvari kalıntı östenitten (FRA) ve blokvari kalıntı östenit (BRA) oluştuğu Şekil 5b'de görülmektedir. Ayrıca, yapıda yer yer ince boyutlu (<5µm) martenzit/östenit (M/A) fazı oluşumu gözlenmektedir. Fırından kalıba transfer ve kalıba yerleştirme aşamalarında bir miktar ferrit dönüşümü oluştuğu öngörülmektedir. Ayrıca, geleneksel hot stamping yöntemine (min. 27 K/sn) kıyasla buradaki yöntemde ön ısıtılmış kalıpta (65 K/sn) daha yavaş bir soğuma oluşması da buna neden olabilir.



Şekil. 5 Prototip TBF çeliğine SEM görüntüleri a) düşük büyütme ve b) büyük büyütme (F: ferrit, B: beynit, M: martenzit, BF: beynitik ferrit, M/A: martenzit/östenit, BRA: blokvari kalıntı östenit, FRA: filmvari kalıntı östenit)

Prototip parçanın mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri uygulanmıştır. Parçaların taban bölgesinden EN ISO 6892-1:2009'e uygun olarak üçer adet numune hazırlanmış ve çekme testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme testleri sonrası elde edilen mekanik özelliklere ait ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Numunelerden 1300 MPa üzerinde çekme (Rm) mukavemeti ve % 10 üzerinde kopma uzama (Ax) sonucu görülmüştür. Sertlik ölçümlerinin sonuçları da Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hot stamping ile üretilen prototip TBF çeliğinin mekanik değerleri

Çelik	Rm, MPa	Ax, %	Sertlik, HV
TBF	1350 ± 19	13,4 ± 1,04	435 ± 13

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada geliştirilen hot stamping yöntemi ile <1 dk altında kalıpta soğuma süresi sonrasında beynitik-martenzit matriksli çelik üretilebildiği görülmüştür. Geleneksel hot stamping yöntemine göre daha yüksek süneklik elde edilmiştir. Sonuçlardan aşağıda verilen tartışmalar çıkarılabilir:

- Hedeflendiği gibi mikroyapısal olarak TBF çeliklerine benzer şekilde büyük oranda beynitik olmakla birlikte kısmen martenzitten oluşan bir matriks içinde ferrit ve ince dağılmış kalıntı östenit içeren mikroyapıların üretimi sağlanmıştır. Elde edilen kalıntı östenit miktarı (%1,0-2,1) TBF çeliklerinde beklenen yaklaşık %10 değerine kıyasla düşüktür.
- Hot stamping uygulanmış prototip parçanın çekme mukavemeti 1300 MPa üzerindedir. Toplam uzama değeri %10' un üzerindedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma sonucunda elde edilen mekanik özellikler TBF çeliklerine benzerdir. Yöntem geleneksel hot stamping çeliklerine göre daha sünek bir malzeme sunmaktadır. Kalıntı östenit miktarı anizotermal bekleme süresinin düşük olması sebebiyle tipik TBF çeliklerine göre daha düşüktür.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma Kocaeli Üniversitesi FBA-2020-2065 numaralı proje tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Larour, Patrick, et al. Influence of post uniform tensile and bending properties on the crash behaviour of AHSS and press-hardening steel grades. na, 2010.
[2] Li, Z. H., et al. "Design of a cold-rolled novel advanced high-strength steel: An analysis of microstructural evolution and mechanical properties." *Materials Characterization* 163 (2020): 110265.
[3] Hu, Xiaohua, and Feng, Zhili. Advanced High-Strength Steel - Basics and Applications in the Automotive Industry. United States: N. p., 2021.
[4] JIN, Xuejun, et al. "A review of current state and prospect of the manufacturing and application of advanced hot stamping automobile steels." *Acta Metall Sin* 56.4 (2020): 411-428.
[5] Leták, Radek, et al. "Effect of Forming and Heat Treatment Parameters on the Mechanical Properties of Medium Manganese Steel with 5% Mn." *Materials* 16.12 (2023): 4340.
[6] Matlock, David K., et al. "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview." *Jestech* 15.1 (2012): 1-12.
[7] Mori, Ken-ichiro, et al. "Hot stamping of ultra-high strength steel parts." Cirp Annals 66.2 (2017): 755-777.
[8] Taylor, Tom, and A. Clough. "Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective." *Materials Science and Technology* 34.7 (2018): 809-861.
[9] Fan, Dong Wei, and Bruno C. De Cooman. "State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts." *Steel research international* 83.5 (2012): 412-433.
[10] Karbasian, Hossein, and A. Erman Tekkaya. "A review on hot stamping." Journal of Materials Processing Technology 210.15 (2010): 2103-2118.
[11] Tong, Chenpeng, et al. "New developments and future trends in low-temperature hot stamping technologies: A review." *Metals* 10.12 (2020): 1652.
[12] Dai, Zongbiao, et al. "Fundamentals and application of solid-state phase transformations for advanced high strength steels containing metastable retained austenite." *Materials Science and Engineering*: R: Reports 143 (2021): 100590.
[13] Midawi, Abdelbaset RH, et al. "Hot-forming of a 980 MPa third generation advanced high strength steel." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1284. No. 1. IOP Publishing, 2023.
[14] Sugimoto, Koh-ichi, Tomohiko Hojo, and Junya Kobayashi. "Critical assessment 29: TRIP-aided bainitic ferrite steels." *Materials Science and Technology* 33.17 (2017): 2005-2009.
[15] Chen, Shangping, Radhakanta Rana, and Chris Lahaije. "Study of TRIP-aided bainitic ferritic steels produced by hot press forming." *Metallurgical and Materials Transactions* A 45 (2014): 2209-2218.
[16] Taylor, T., et al. "TRIP assisted press hardened steel by the anisothermal bainitic ferrite transformation." *Journal of Materials Processing Technology* 289 (2021): 116950.
[17] Liu, Heping, et al. "Enhanced mechanical properties of a hot stamped advanced high-strength steel treated by quenching and partitioning process." *Scripta Materialia* 64.8 (2011): 749-752.
[18] Liu, Heping, et al. "Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process." *Materials characterization* 62.2 (2011): 223-227.
[19] Bulent, Aydemir. "ISO 6892-1 Standardına Göre Metalik Malzemelerin Çekme Özeliklerinin Belirlenmesi." (2023).

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Savaş Gemisi Filosu Atama Optimizasyonu

Nezir AYDIN[ab], Hakan KAYA[a]*

[a]Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b]Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Doha/Qatar
[*]**Sorumlu Yazar:** hakan.kaya2@std.yildiz.edu.tr

ÖZET

Güçlü bir Deniz Kuvveti oluşturmak, karşılaşılan tüm görevleri başarıyla gerçekleştirmekle mümkündür. Ülkelerin Deniz Kuvvetleri; mevcut kaynakların kısıtlı olması, planlı onarım faaliyetleri ve talep edilen görevlerin yoğunluğu gibi bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Ayrıca, yıl içerisinde ortaya çıkan görevlerin amacına göre ihtiyaç duyulan savaş gemisi sayısı ve gemi tipi değişkenlik gösterebilmektedir. Bu zorlukları aşabilmek için, Deniz Kuvvetlerinin filolarında bulunan savaş gemileri ile talep edilen görevler arasında dengeli ve etkili bir ilişki kurmak gereklidir. Bu noktada başarılı bir filo planlaması yapabilmek için her görevin zamanında ve eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda planlama yapılırken atamaların maliyete etkisi, gemiler arası iş yükü dengesi ve gemi personelinin sosyal ihtiyaçları göz ardı edilmemelidir. Bu aşamada, karar verilmesi gereken temel konu, tüm görevleri karşılayacak gemi sayısının belirlenmesi ve görevlendirilen gemiler arasında iş yükü en fazla olan geminin iş yükünün en aza indirilmesidir. Bu çalışma, bir ülkenin Deniz Kuvvetleri tarafından, yıl içinde planlanan görevlere mevcut kaynakların atanması problemine odaklanmaktadır. Problem, karma tamsayılı olarak modellenmiş ve CPLEX çözüm aracı kullanılarak optimum atama sonuçları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Filo Atama Problemi (FAP), Görev Atama, Karma Tamsayılı Programlama, Savaş Gemisi*

Warship Fleet Assignment Optimization

Nezir AYDIN[ab], Hakan KAYA[a]*

[a]Yıldız Technical University, Faculty of Machine, Department of Industrial Engineering, Istanbul/Türkiye.
[b]Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Doha/Qatar
[*]**Corresponding Author:** hakan.kaya2@std.yildiz.edu.tr

ABSTRACT

Creating a strong Naval Force is possible by successfully accomplishing all encountered tasks. Naval Forces of countries face a series of challenges such as limited available resources, planned maintenance activities, and the intensity of requested tasks. Additionally, the number and type of warships required may vary depending on the purpose of tasks arising throughout the year. To overcome these challenges, it is necessary to establish a balanced and effective relationship between the warships in the Naval Forces' fleets and the requested tasks. Successful fleet planning requires each task to be carried out in a timely and complete manner. Simultaneously, factors such as the impact of assignments on costs, workload balance between ships, and the social needs of ship personnel should not be overlooked during planning. At this stage, the key issue to decide is determining the number of ships to meet all tasks and minimizing the workload of the ship with the highest workload among the assigned ships. This study focuses on the problem of allocating available resources to planned tasks by a country's Naval Forces throughout the year. The problem is modeled as a mixed-integer and solved using the CPLEX solution tool to obtain optimal assignment results.

Keywords: *Fleet Assignment Problem (FAP), Task Assignment, Mixed-Integer Programming, Warship*

I. GİRİŞ

Ülkelerin Deniz Kuvvetleri'nin operasyonel etkinlikleri ve yıl içerisindeki karşılaştıkları görevlerin başarı ile tamamlanabilmesi, modern ve etkin filo yönetimi stratejisi gerektirmektedir. Bu noktada ihtiyacı en verimli şekilde karşılamak için platformların görevlere optimize edilmiş bir atama modeline göre atanmaları gerekmektedir. Atama yapılırken her göreve mutlaka atama yapılması, platformlar arasındaki görev yükü dengesinin dikkate alınması ve atama yapılan platform sayısının en küçüklenmesi büyük önem taşımaktadır. Problem, doğası itibariyle filo atama problemi (FAP) kategorisine dahil edilmiş ve bu çerçevede ele alınmıştır. Literatürde FAP ile alakalı pek çok çalışma mevcut olmasına rağmen bu çalışmaların büyük bir bölümünde havayolları problemlerine odaklanılmıştır. FAP'ı savaş gemisi filosu atama problemi (SFAP) olarak ele alan bütüncül bir çalışma bulunmamakla beraber benzer çalışmalar olarak; Tekkanat [1], çalışmasında şehir içi ve dışı hatlarda, gemilerin uygun hatlara atanması problemini incelemiş, Kiremitçi [2], çalışmasında denizyolu yük taşımacılığında oluşan gemi rotalama ve çizelgeleme problemini ele almış, Song vd. [3], çalışmalarında konteyner hat işini mevcut denizcilik pazarının özellikleriyle birleştirerek, rasyonel iki amaçlı, karma tamsayılı model önermişler, Yücel [4], çalışmasında şehir içi toplu taşımacılığında vapur sefer atama ve rotalama problemini incelemiş, Ahmadi vd. [5], çalışmalarında, savaş gemisi inşa sürecinin planlama ve zamanlama zorluklarına çözüm getirmeyi amaçlamışlardır.

II. MATERYAL METOT

FAP ile alakalı çalışmalar incelendiğinde literatürde genellikle yaklaşık çözüm yöntemleri ile simülasyon çözüm tekniklerinin kullanıldığı görülmektedir. Fakat SFAP'ın doğası gereği bu çözüm teknikleri tam olarak gerçeği ifade etmemektedir. SFAP'da her görev mutlaka bir platforma atanmalı ve başarı ile tamamlanmalıdır. Yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılarak yapılan bir atamada, bazı görevler boşta kalabilmekte ve platformların iş yükü dengesi bozulabilmektedir. Böyle bir durumda çözüm, ilgili kısıtları sağlıyor olsa bile en iyi sonuç garantisi vermez. Bu nedenle bu çalışmada SFAP, karma tamsayılı olarak modellenmiş ve CPLEX çözüm aracı kullanılarak optimum atama sonuçları elde edilmiştir.

A. Tamsayılı Programlama

Tamsayılı Programlama, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir matematiksel programlama yöntemidir. Bu yöntemde, karar değişkenleri tam sayı değerleri alır ve bir hedef fonksiyonunu optimize etme amacıyla belirlenen kısıtlar altında çözüm aranır. Tamsayılı Programlama problemleri genellikle karmaşık karar verme süreçlerini modellemek ve çözmek için kullanılır. Özellikle, operasyonel araştırma, endüstri mühendisliği, lojistik yönetimi, finansal analiz gibi alanlarda sıklıkla karşılaşılan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. Bu teknik, kaynakların etkin bir şekilde yönetilmesine, maliyetlerin azaltılmasına ve verimliliğin artırılmasına yardımcı olur. İki temel şekilde ifade edilirler (Frederic vd. [5]); Değişkenlerinin sadece bazılarının tam sayılı olarak ifade edilen modele, Karma Tamsayılı Programlama denir. Değişkenlerinin tamamının tamsayılı olmasının istendiği modele de, Saf Tamsayılı Programlama denir.

B. Problemin Tanımı ve Matematiksel Modeli

Deniz Kuvvetleri, bir ülkenin savunma stratejisinde, denizlerdeki güvenliği sağlamak, ulusal çıkarlarını korumak için yıl içerisinde planlı görev, eğitim ve tatbikat faaliyetleri icra etmektedirler. Bu faaliyetler icra edilirken Deniz Kuvvetleri filolarında bulunan platformların etkin bir atama planına göre atanmaları gerekmektedir. Bu planda her görev mutlaka karşılanmalıdır. Platformların yıl içerisinde görev yapabilecekleri süreler sınırlıdır ve bir platforma yıl içerisindeki kapasitesini aşmayacak şekilde atama yapılabilmektedir. Görevlerin önem dereceleri ve içeriğine bağlı olarak farklı sayılarda ve farklı tiplerde platform gereksinimleri ortaya çıkabilmektedir. Bunun yanı sıra, görevler birbirinden farklı zamanlarda ve yerlerde atama gerektirmektedir. Bu atamalarda platformların göreve intikal ve geri intikal süreleri gibi çeşitli faktörler de dikkate alınmalıdır. Görevlere atanan platformlar, ilgili görev tamamlanana kadar meşgul edilmekte ve faaliyetlerin başarılı bir şekilde sonuçlanması için görevi tamamlanan platformlar yeniden başka bir görevde kullanılmaktadır. Ayrıca, platformların düzenli bakım onarım faaliyetleri de söz konusudur. Tersane faaliyetleri için belirlenen zaman aralıklarında, platformlar belirli bir süreyle

tersanede bakıma alınmaktadır. Tüm bu faaliyetlerde platform personelinin ihtiyaçları da göz ardı edilmemelidir. Personelin sürekli olarak görev yapmasının sürdürülebilir olmadığı dikkate alınarak, dinlenme maksadıyla limanda kalma süreleri de planlamaya dahil edilmelidir. Bu yaklaşım ile platform personelinin moral ve motivasyonunu artırarak operasyonel etkinliği olumlu yönde değiştirmek hedeflenmektedir. Optimizasyon sonucunda elde edilen çıktılar kullanılarak stratejik karar alma süreçlerine rehberlik edilebilecektir. Problem, karma tamsayılı olarak modellenmiş ve CPLEX çözüm aracı kullanılarak optimum atama sonuçları elde edilmiştir.

C. Matematiksel Model

İndisler

i : platform indisi $i \in I$

j : görev indisi $j \in J$

t : zaman indisi $t \in T$

Parametreler

a_{ij} : i. platform j. görevi üstlenebilecek yeterlilikte ise 1, d.d 0

b_j : j. görevinin başarı ile tamamlanabilmesi için gerekli platform sayısı

sd_j : j. görevin başlayacağı zaman (gün)

f_j : j. görevin sınıfı

cd_j : j. göreve platformların intikal süresi (gün)

crd_j : j. görevden platformların geri intikal süresi (gün)

p_j : j. görevin süresi (gün)

c_i : i. platformun yıl içerisindeki toplam kapasitesi (gün)

sr_i : i. platformun planlı onarım başlangıç zamanı (gün)

dr_i : i. platformun planlı onarım süresi (gün)

u_j : j. görevden sonra görevlendirilme yapılmayacak süre (gün)

$u_j = \frac{p_j}{2}$

Karar Değişkenleri

x_{ijt} : i. platform j. göreve t. günde atanmışsa 1, d.d. 0

y_i : i. platform atanmışsa 1, d.d. 0

k_i : i. platformun toplam görev süresi (gün)

kk : atama sonucunda görev süresi en uzun olan platform (gün)

Amaç Fonksiyonları

$$min\left(\left(\frac{(\sum_{i=1} y_i)-15}{5}\right)+\left(\frac{kk-104}{98}\right)\right)$$

$$\sum_{j=1}\sum_{t=1} x_{ijt} * p_j \leq k_i \qquad \forall_i \qquad (1)$$

$$k_i \leq kk \qquad \forall_i \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}\sum_{t=1} x_{ijt} \leq |J| * y_i \qquad \forall_i \qquad (3)$$

$$\sum_{j=1}\sum_{t=1} x_{ijt} * p_j \leq c_i \qquad \forall_i \qquad (4)$$

$$\sum_{i=1} x_{ijt} = b_j * sd_j \qquad \forall_{j,t} \quad (5)$$

$$\sum_{t=1} x_{ijt} \leq 1 \qquad \forall_{i,j} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1} x_{ijt} \leq a_{ij} \qquad \forall_{i,j} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1} x_{ijt} \leq 1 - \sum_{t=sd_j}^{sd_j+c_{j+crd_j+u_j+p_j}} x_{ij't} \qquad \forall_{i,j\neq j'} \quad (8)$$

$$x_{ijt} + x_{ij't} \leq (f_{j'} - f_j) + 1 \qquad \forall_{i,j\neq j',t} \quad (9)$$

$$\sum_{t=sr_i}^{sr_i+dr_i} x_{ijt} \leq 0 \qquad \forall_{i,j} \quad (10)$$

Amaç en büyük platform yükünü enküçüklerken aynı zamanda yıl içerisinde atanan toplam platform sayısını enazlamakdır. Kısıt (1), her platformun ayrı ayrı toplam görev sürelerini ifade etmektedir. Kısıt (2), atama sonucunda platformlar arasında en uzun görev süresine sahip platformu ifade etmektedir. Kısıt (3), toplam atanan gemi sayısı kısıtıdır. Kısıt (4), her platformun kapasite kısıtıdır. Kısıt (5), görevlerin talep ettiği platform sayısı ve görev başlama zamanı kısıtıdır. Kısıt (6), bir görevin bir platforma tüm atama süresi boyunca en fazla 1 kere atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (7), platform yeterlilikli olduğu göreve atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (8), platform meşgulse görev atanmamasını ve platformun ilgili görevden sonra belli bir süre boşta kalmasını sağlamaktadır. Kısıt (9), platformun art arda aynı sınıf göreve atanmamasını sağlamaktadır. Kısıt (10), platforma planlı onarım süresince atama yapılmamasını sağlamaktadır.

III. SONUÇLAR

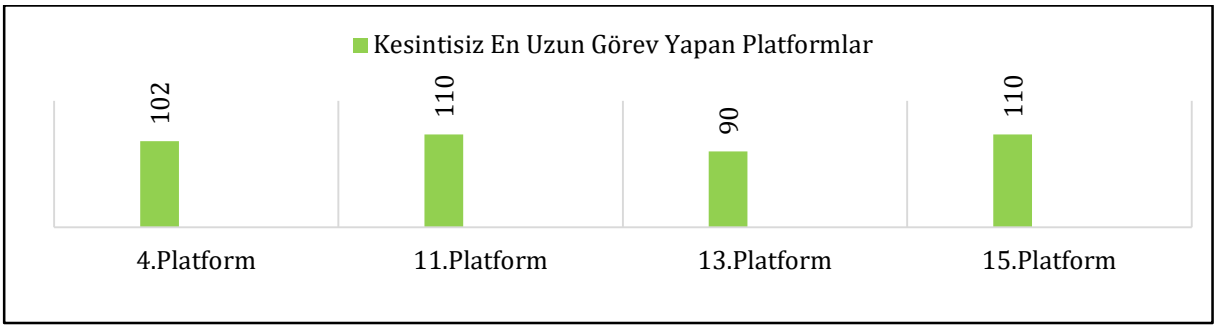
SFAP problemi NEOS Sürüm 6.0 sunucusu prod-sub-1.neos-server.org ana bilgisayarında milp:Cbc:GAMS'de ile çözülmüştür. Problem 29 görev ve 20 platform olarak ele alınmış, 1 yıllık filo planlaması için model kurulup, 0.898 saniyede çözülmüştür. Problemin çözümü sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Platform atama planı Tablo 1.'de verilmiştir. platformların 1. görevleri mavi, 2. görevleri sarı ve 3. görevleri yeşil renk ile gösterilmiştir.

Tablo 1. Platform Görev Atama Planı

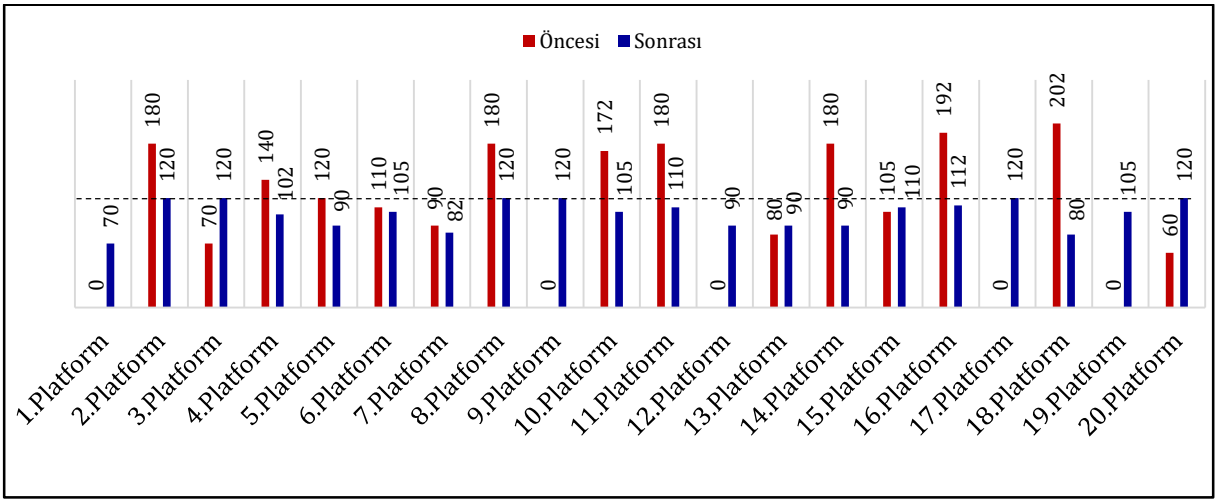
Görev B. Z.	1	61	91	121	132	136	155	181	241	271	281	301
1.Platform				27.Görev					11.Görev			
2.Platform									4.Görev			26.Görev
3.Platform		8.Görev							5.Görev			
4.Platform	13.Görev						29.Görev					
5.Platform			21.Görev						25.Görev			
6.Platform	17.Görev											
7.Platform				27.Görev			29.Görev	24.Görev				
8.Platform								10.Görev				12.Görev
9.Platform								24.Görev				6.Görev
10.Platform						18.Görev			25.Görev			
11.Platform					28.Görev					16.Görev		
12.Platform	20.Görev											
13.Platform			14.Görev									
14.Platform										23.Görev		
15.Platform					28.Görev			15.Görev				
16.Platform				27.Görev			29.Görev	22.Görev				
17.Platform				9.Görev								26.Görev
18.Platform	7.Görev				28.Görev							
19.Platform		2.Görev									19.Görev	
20.Platform	1.Görev			3.Görev								

Atama sonucunda kesintisiz en uzun görev yapan platformlar Şekil. 1'de verilmiştir. 4 platform 90 gün kesintisiz görev yapmıştır.



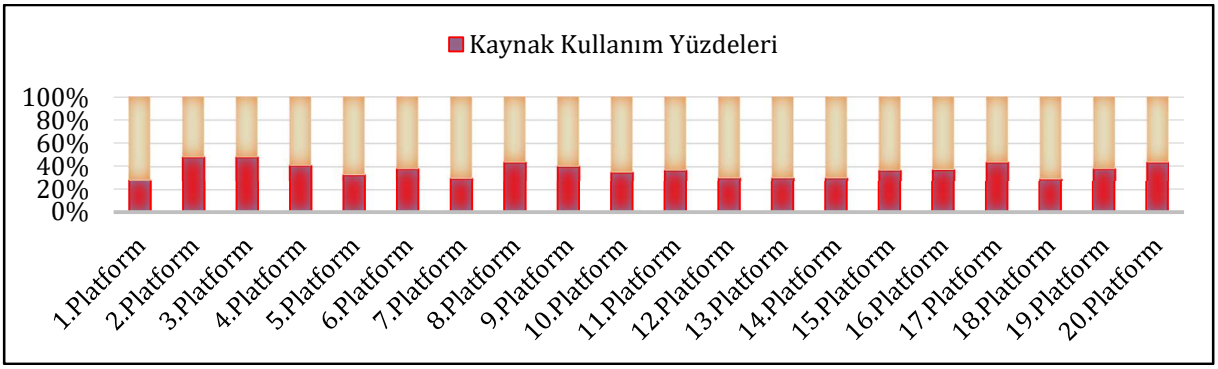
Şekil. 1 Kesintisiz En Uzun Görev Yapan Platformlar

Çalışma öncesi ve sonrası platformların görev süreleri arasındaki değişim Şekil. 2'de verilmiştir. Çalışma öncesi 202 gün olan en büyük görev süresine sahip platform çalışma sonucunda 120 güne kadar düşürülmüştür.



Şekil. 2 Platform Görev Sürelerinin Çalışma Öncesi ve Sonrası

Platformların atama sonucunda kaynak kullanım yüzdeleri Şekil. 3'te verilmiştir.



Şekil. 3 Kaynak Kullanım Yüzdeleri

IV. TARTIŞMA

Çalışma sonucunda oluşturulan atama planına göre, görevin uzunluğu ile platformlara atanan görev sayısının ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca uzun süreli görevler ile görevlendirilen platformların, muhtemel diğer görevlerinin atama planına göre kısa süreli görevlerden seçildiği görülmüştür. Çalışmanın öncesi ve sonrası arasındaki, platform görev sürelerinin değişimi incelendiğinde, ilk duruma göre görev sürelerinin ortalamaya yaklaştığı, platformlar arasında yük dengesinin kurulduğu görülmüştür. Tüm bu bulgular ışığında 29 görev ve 20 platformdan oluşan 1 yıllık atama planının başarı ile oluşturulduğu görülmüştür.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada; bir ülkenin Deniz Kuvvetleri'ne ait platformlar arasında yük dengesinin kurulmaya çalışıldığı Savaş Gemisi Filosu Atama Problemi(SFAP) ele alınmıştır. Bu problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş, modelin çözülmesi sonucunda, platformlar arası görev dağılımının ilk duruma kıyasla önemli derecede iyileştiği görülmüştür. Ancak önerilen yöntemin performansı problem boyutu ile ters orantılıdır. Gelecekte çok daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için metasezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu bildiri, Hakan KAYA'nın Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırladığı ''Savaş Gemisi Filosu Atama Optimizasyonu'' başlıklı yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Tekkanat A.O., "Hat Yönetiminde Simülasyon Tabanlı Optimizasyon ve İstanbul Deniz Otobüsleri A.Ş.'de Bir Uygulama", İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (2009).

[2] Kiremitçi S., "Denizyolu Yük Ta¸sımacılıgında Rotalama ve Çizelgeleme", İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (2011).

[3] Song Y. and Yue Y., "Optimization Model of Fleet Deployment Plan of Liners", Procedia Engineering, 137 391 – 398, (2016).

[4] Yücel E., "Şehir İçi Deniz Yolu Toplu Taşımacılığında Vapur Atama ve Rotalama Optimizasyonu: İstanbul Şehir Hatları Uygulaması", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21 (62), 357-368, (2019).

[5] Ahmadi, Sukandari B. and Markhrowi A., "The Warship Assignment Schedule Using Integer Programming Model", International Journal of ASRO, 10 (03), 49-57, (2019).

[6] (2023) [Çevrimiçi]. Erişim: https://avesis.yildiz.edu.tr/nzraydin/dokumanlar

[7] (2023)[Çevrimiçi].Erişim:https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/103788/mod_resource/content/0/SY%2013%20Tamsay%C4%B1l%C4%B1%20Programlama%20-%20Modelleme%20ve%20Cozum.pdf

[8] Hillier,Frederick S., Lieberman,Gerald J.,(1986) Introduction To Operations Research,Holden-Day,Inc,California.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Betonarme Kolonlarda Hasar Tespit Performansının Sentetik Veriler ve Makine Öğrenmesi Kullanılarak Değerlendirilmesi

Muhammed Serdar AVCI[a], Emre Ercan[a], Ayhan Nuhoğlu[a], Bengi Arısoy[a], Çağlayan Hızal[a], Mahmut Pekediş[b]*

[a]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye.
[b]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** muhammed.serdar.avci@ege.edu.tr

ÖZET *(Cambria, 10)*

Betonarme kolonlar yangına karşı özellikle hassastır ve yangın hasarı yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde tehlikeye atabilir. Bu tür hasarların doğru bir şekilde değerlendirilmesi, güvenliğin sağlanması ve onarım kararlarının yönlendirilmesi için kritik öneme sahiptir. Ancak, hasarlı kolonlardan yeterli veri toplamak pahalı ve zaman alıcı olabilir. Bu çalışma, bu zorluğun üstesinden gelmek için Çekişmeli Üretici Ağlar (ÇÜA'lar) kullanan yenilikçi bir yaklaşım önermektedir. Çalışma, sentetik hasarlı kolon ivme verileri üreterek, sınırlı gerçek dünya veri setlerini genişletmeyi ve hasar tespiti için sağlam makine öğrenimi modellerinin eğitimini ve değerlendirmesini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırma, ÇÜA'ların bu hasarlı sinyallerin karmaşık istatistiksel özelliklerini yakalama yetisini araştırmaktadır. Bu sentetik veri, gerçek veri setine stratejik olarak farklı oranlarda entegre edilecek ve bu sayede çeşitli makine öğrenimi algoritmalarının performansına (Evrişimli Sinir Ağları Networks (ESA'lar), XGBoost ve Destek Vektör Makineleri (DVM'ler) dahil) etkisinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Birincil hedef, sentetik veri büyütmenin hasar tespit modellerinin doğruluğunu ve genelleştirilebilirliğini artırıp artırmadığını değerlendirmektir. Çalışma, farklı algoritmaların performansını büyütülmüş veri setlerinde karşılaştırarak, bu özel uygulama için doğruluk, yorumlanabilirlik ve hesaplama verimliliği gibi faktörleri göz önünde bulundurarak en etkili yaklaşımı belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmanın bulgularının, ÇÜA'ların veri büyütme potansiyelini ve sentetik verilerin betonarme kolonlarda hasar tespiti için makine öğrenimi modellerinin performansını artırma avantajlarını göstererek yapısal sağlık izleme alanına katkıda bulunması beklenmektedir. Bu araştırma, daha verimli ve uygun maliyetli hasar değerlendirmesini kolaylaştırma vaadi taşımakta ve nihayetinde artırılmış yapısal güvenlik ve bilgili onarım kararlarına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Yapısal Sağlık İzleme, Çekişmeli Üretici Ağlar, Sınıflandırma Algoritmaları, Sentetik Veri Üretimi, Yapısal Hasar Tespiti.*

Evaluating Damage Detection Performance in Reinforced Concrete Columns Using Synthetic Data and Machine Learning

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

Reinforced concrete (RC) columns are particularly vulnerable to fire damage, which can significantly compromise their structural integrity. Accurate assessment of such damage is crucial for ensuring safety and guiding repair decisions. However, collecting sufficient data from damaged columns can be expensive and time-consuming. This study proposes a novel approach leveraging Generative Adversarial Networks (GANs) to tackle this challenge. By generating synthetic, damaged column acceleration data, the study aims to augment limited real-world datasets and empower the training and evaluation of robust machine learning models for damage detection. The research explores the feasibility of using GANs to capture the complex statistical characteristics of these damaged signals. This synthetic data will be strategically integrated into the real dataset at varying ratios, allowing for a systematic evaluation of its impact on the performance of various machine learning algorithms, including Convolutional Neural Networks (CNNs), XGBoost, and Support Vector Machines (SVMs). The primary objective is to assess whether synthetic data augmentation can enhance the accuracy and generalizability of damage detection models. By comparing the

performance of different algorithms on augmented datasets, the study aims to identify the most effective approach for this specific application, considering factors like accuracy, interpretability, and computational efficiency.

Keywords: *Structural Health Monitoring, Generative Adversarial Networks, Classification Algorithms, Synthetic Data Generation, Structural Damage Detection*

I. GİRİŞ

Reinforced concrete (RC) columns are pivotal structural elements in buildings and infrastructure, furnishing essential support and stability [1]. Nevertheless, their vulnerability to fire damage poses a significant peril to structural integrity, necessitating precise assessment methodologies to ensure safety and guide effective repair strategies [2]. Traditional approaches to evaluating fire-induced damage frequently rely on labor-intensive and expensive data collection procedures, constraining the availability of adequate real-world datasets for robust analysis [3]. In response to this challenge, this study proposes a pioneering approach that harnesses Generative Adversarial Networks (GANs) to mitigate the scarcity of data for damage detection in RC columns [4]. By leveraging synthetic data generation, the study endeavors to enrich limited real-world datasets with simulated damaged column acceleration data. This innovative strategy not only streamlines the training and evaluation of machine learning models but also furnishes insights into the intricate statistical characteristics of damaged signals [5]. The advances in data science in the last few decades have also benefitted Structural Health Monitoring (SHM) significantly [6]. Artificial Intelligence (AI), particularly Machine Learning (ML) methods, has been extensively utilized for vibration-based damage diagnostics of civil structures, owing to their observed high performances in learning from complex data structures [7]. AI-based data-driven techniques used for damage diagnostics and prognostics applications are centered on historical data of the structures and require a substantial amount of data for data-driven prediction models [8]. One of the recent advancements in this domain is the development of Cycle-Consistent Wasserstein Deep Convolutional GAN with Gradient Penalty (CycleWDCGANGP), a variant of Generative Adversarial Networks (GANs), which aims to investigate the domain translation between undamaged and damaged acceleration data [9]. Although not utilized in our study, this model showcases the evolving landscape of AI-driven approaches in structural health monitoring. The primary objective of our research is to explore the feasibility and effectiveness of employing GANs for synthesizing realistic damaged column acceleration data. By strategically incorporating synthetic data into the real dataset at various ratios, we aim to systematically assess its impact on the performance of diverse machine learning algorithms [10]. Specifically, Convolutional Neural Networks (CNNs), XGBoost, and Support Vector Machines (SVMs) will be deployed to gauge the accuracy and generalizability of damage detection models [11]. Through comparative analysis of algorithmic performance on augmented datasets, our study endeavors to identify the most efficacious approach for detecting damage in RC columns. Key considerations encompass the accuracy of predictions, interpretability of results, and computational efficiency of the algorithms [12]. By addressing these factors, the research aims to furnish valuable insights into the optimization of damage detection methodologies for enhancing structural safety and resilience in the face of fire-induced hazards [13].

II. MATERIALS & METHODS

In the experimental setup, four specimens of reinforced concrete elements measuring 20x20x320 cm^3 were manufactured for conducting forced vibration tests under controlled laboratory conditions. These specimens were reinforced with S420 structural steel, while C30 concrete was utilized in their construction.

Each specimen was equipped with four Ø16 structural steel bars and 31 Ø8 stirrups, spaced at 10 cm intervals. Following the placement of reinforcements, three thermocouples with adequate thermal insulation and five strain gauges were strategically positioned around the reinforcements. Subsequently, the concrete pouring process was executed.

A. Forced Vibration Test

During the pre-fire forced vibration test, the specimens were positioned as simply supported beams. Subsequently, four accelerometers were affixed to the underside of the sample at intervals of 640 mm using a thin layer of epoxy. A Modal Shaker, placed at the midpoint of the sample, was connected to the YMC LA-100 Power Amplifier, which in turn was linked to the Agilent 33210A 10MHz Signal Generator and then to

the computer. The experimental procedure proceeded as follows: random signals generated on the computer within the frequency range of 0 to 350 Hz using MATLAB were transmitted to the signal generator. These signals, converted from digital to analog in the signal generator, were then amplified up to 2.1 Vrms by the amplifier before being transmitted to the Modal Shaker. The forced vibrations induced by the Modal Shaker were measured by the accelerometers attached to the sample. The acquired data was transferred to the data acquisition device. The LabVIEW 2011 program was utilized to collect the data from the data acquisition device. A total of eighteen sets of data were collected for each sample.

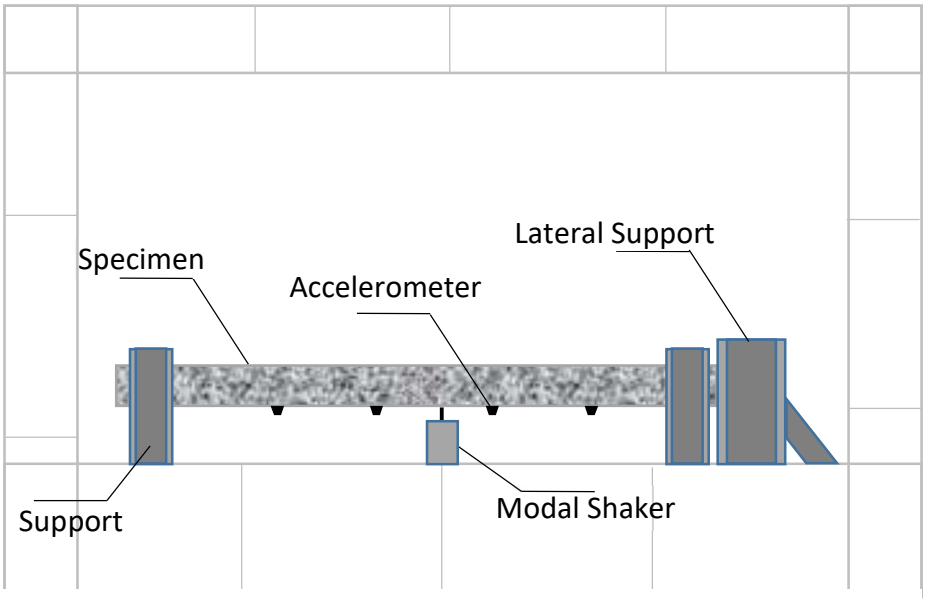


Figure 1. Experimental Setup

B. Controlled Fire Exposure Test

Following the pre-fire forced vibration tests, the samples were arranged with 20 pieces of 15x25x60 cm^3 aerated concrete blocks and 100 pieces of firebrick tiles to ensure uniform heat distribution and prevent outward spread (refer to Figure 2). Each sample was then positioned as a simply supported beam within this setup. Subsequently, a Turbo Triggered Insulation Shawl - Nozzle with a diameter of 5 cm and a length of 75 cm, along with four 12 kg LPG cylinders, were utilized to subject the samples to elevated temperatures from their lower surfaces for a duration of 90 minutes. Temperature measurements were taken at 15-minute intervals. The oven temperature surpassed 500°C. Due to the exposure of the columns to fire from their lower surfaces, the temperatures in the lower part were higher compared to the middle and upper parts. Specifically, the lower part reached approximately 300°C, while the middle and upper parts were around 100°C, as observed in Table 1-4.

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 1 During Fire Exposure

Time (min)	***Oven (⁰C)***	***Upper Thermocouple (⁰C)***	***Middle Thermocouple (⁰C)***	***Lower Thermocouple (⁰C)***
0	28.5	29	30	30
15	347.3	43	55	100
30	364.4	58	66	125
45	389.1	65	74	157
60	436.2	80	86	191
75	471.1	100	101	255
90	500.7	110	130	295

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 2 During Fire Exposure

Time	***Oven***	***Upper***	***Middle***	***Lower***

(min)	(⁰C)	Thermocouple (⁰C)	Thermocouple (⁰C)	Thermocouple (⁰C)
0	29.5	30	30	30
15	389.5	42	44	138
30	405.2	71	76	227
45	432.2	95	95	242
60	481.5	103	109	308
75	520.4	111	121	352
90	545.2	126	140	374

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 3 During Fire Exposure

Time (min)	Oven (⁰C)	Upper Thermocouple (⁰C)	Middle Thermocouple (⁰C)	Lower Thermocouple (⁰C)
0	28.5	30	29	30
15	409	32	63	139
30	409.6	45	102	199
45	439.6	62	118	253
60	491.9	79	147	300
75	519.4	94	170	340
90	550.4	110	193	374

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 4 During Fire Exposure

Time (min)	Oven (⁰C)	Upper Thermocouple (⁰C)	Middle Thermocouple (⁰C)	Lower Thermocouple (⁰C)
0	30.4	30	30	31
15	446.1	32	49	58
30	462.1	47	78	82
45	476.2	61	91	94
60	501	79	106	106
75	528.8	92	110	115
90	552.5	113	129	129

Following the completion of the fire exposure tests, all samples underwent another round of forced vibration testing. The objective of this post-fire forced vibration test was to evaluate the structural integrity and dynamic response of the specimens subsequent to their exposure to fire conditions.

Conducting the forced vibration test after the fire exposure allowed researchers to assess any alterations in the specimens' dynamic behavior resulting from structural damage induced by the fire, leveraging deep learning techniques. This examination provided valuable insights into the impact of fire on the mechanical properties, damping characteristics, and natural frequencies of the columns.

Comparing the results of the pre-fire and post-fire forced vibration tests enabled a thorough examination of the specimens' structural performance and potential degradation due to fire exposure. The data gathered during this phase of the study significantly contributed to understanding the resilience and post-fire behavior of the columns, facilitating the development of effective post-fire inspection and rehabilitation strategies for structures affected by fire incidents.

By integrating the findings from the fire exposure tests and subsequent forced vibration tests, the research aimed to advance the comprehension of the structural response and performance of columns subjected to fire events. These insights hold implications for enhancing fire safety protocols, structural design methodologies, and maintenance practices to ensure the sustained safety and reliability of structures exposed to fire hazards.
zards.



Figure 2. Fire Exposure Oven

C. Generative Adversarial Networks (GANs) and Rationale for Usage

Generative Adversarial Networks (GANs) represent a cutting-edge class of machine learning models that have demonstrated remarkable success in generating synthetic data that closely resembles real-world samples. Introduced by [14], GANs consist of two neural networks, the generator and the discriminator, trained simultaneously in an adversarial manner.

The generator network learns to generate synthetic data samples from random noise, aiming to mimic the distribution of real data. Simultaneously, the discriminator network learns to distinguish between real and synthetic data samples. Through iterative training, the generator improves its ability to generate increasingly realistic samples, while the discriminator enhances its ability to differentiate between real and synthetic data.

The utilization of GANs in this study is motivated by the scarcity of real-world data available for damage detection in reinforced concrete (RC) columns, particularly under fire-induced conditions. Traditional data collection methods for such scenarios are often limited by practical constraints, including the expense and complexity of conducting controlled experiments.

By leveraging GANs, this study aims to overcome the limitations of data scarcity by generating synthetic damaged data that closely mimics the statistical characteristics of real-world acceleration signals obtained from fire-damaged RC columns. The use of GANs enables the augmentation of limited real datasets, thereby enriching the training data available for machine learning models.

Furthermore, GANs offer the advantage of capturing the complex relationships and underlying data distributions present in the acceleration signals of damaged RC columns. This enables the generation of synthetic data that not only enhances the diversity of the dataset but also facilitates the training of more robust and generalizable machine learning models for damage detection.

In summary, the adoption of GANs in this study serves as a powerful tool for augmenting real-world datasets, overcoming data scarcity challenges, and improving the performance and reliability of machine learning models for damage detection in RC columns subjected to fire-induced conditions.

D. Preparation of the Dataset

The dataset utilized in this study comprises acceleration data obtained from three specimens of reinforced concrete (RC) columns, representing both healthy and damaged conditions. The data collection process involved subjecting the specimens to controlled loading conditions, simulating various structural states, including intact and fire-damaged conditions.

For each specimen, acceleration data was collected using high-fidelity sensors positioned at strategic locations along the column's height. The sensors recorded acceleration signals in multiple axes, capturing the dynamic response of the column to applied loads. To ensure data quality and consistency, rigorous calibration procedures were implemented before and after each data collection session.

The collected acceleration data was then labeled according to the corresponding condition of the specimen, distinguishing between healthy and damaged states. The labeling process was conducted based on visual inspection and non-destructive testing techniques, such as ultrasonic pulse velocity testing and acoustic emission analysis, to accurately assess the structural condition of the specimens.

To generate synthetic damaged data for the fourth specimen, a Generative Adversarial Network (GAN) was trained using the acceleration data from the three available specimens. The GAN architecture comprised a generator and a discriminator, trained in an adversarial manner to learn the underlying data distribution and generate realistic acceleration signals.

During training, the GAN was provided with pairs of healthy and damaged acceleration data samples from the three specimens. The generator network learned to transform healthy acceleration signals into corresponding damaged representations, while the discriminator network was trained to distinguish between real and synthetic data. Through iterative training iterations, the GAN learned to produce synthetic damaged data that closely resembled the characteristics of real-world acceleration signals obtained from fire-damaged RC columns.

Once the GAN training process was completed, the trained generator network was employed to generate synthetic damaged data for the fourth specimen. By inputting healthy acceleration signals from the fourth specimen into the generator network, synthetic damaged acceleration signals were generated, simulating the dynamic response of the column under fire-induced conditions.

The synthetic damaged data generated by the GAN were combined with the real-world acceleration data from the fourth specimen to form an augmented dataset for training and evaluation purposes. Synthetic data was generated at three different ratios: 20%, 50%, and 80%, relative to the size of the real dataset. For a visual representation of the distribution of training examples by damaged type for each synthetic data ratio, refer to Figure 3.

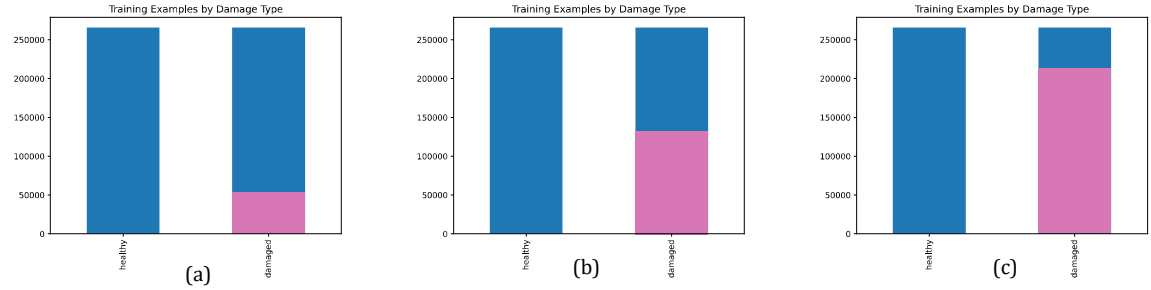


Figure 3. Training examples by Damage Type (a) %20 (b) %50 (c) %80 synthetic damaged data

E. Classification Models

In this study, we employ three distinct machine learning algorithms for the classification task of damage detection in reinforced concrete (RC) columns subjected to fire-induced conditions. These algorithms, including Convolutional Neural Networks (CNNs), Support Vector Machines (SVMs), and XGBoost, will be trained on datasets augmented with synthetically generated damaged data at varying ratios (20%, 50%, and 80%).

Convolutional Neural Networks (CNNs):

CNNs represent a class of deep learning models specifically designed for processing structured grid data, such as images and time-series signals. CNNs consist of multiple layers of convolutional, pooling, and fully connected layers, which enable the automatic extraction of hierarchical features from input data.

In the context of damage detection in RC columns, CNNs offer the capability to learn intricate patterns and spatial dependencies present in acceleration signals obtained from sensors mounted along the column's height. By leveraging the hierarchical feature extraction capabilities of CNNs, the model can effectively discern subtle differences between healthy and damaged acceleration signals, facilitating accurate classification.

Support Vector Machines (SVMs):

SVMs are a class of supervised learning models commonly used for classification tasks. SVMs operate by mapping input data into a high-dimensional feature space and identifying the optimal hyperplane that maximally separates different classes in this space. SVMs are particularly well-suited for scenarios with high-dimensional input data and non-linear decision boundaries.

In the context of damage detection in RC columns, SVMs offer a robust and versatile approach for classifying acceleration signals into healthy and damaged categories. By exploiting the inherent structural properties of the data, SVMs can effectively delineate the boundary between healthy and damaged signal patterns, facilitating accurate classification even in the presence of noise and variability.

XGBoost:

XGBoost stands for eXtreme Gradient Boosting, a popular ensemble learning technique that utilizes a collection of weak learners, typically decision trees, to form a strong predictive model. XGBoost iteratively

builds decision trees that correct the errors of previous models, thereby minimizing the overall prediction error.

In the context of damage detection in RC columns, XGBoost offers several advantages, including scalability, efficiency, and robustness to overfitting. By combining the predictions of multiple decision trees, XGBoost can capture complex relationships and interactions present in the acceleration signals, enabling accurate classification of healthy and damaged states.

The experimental design involves training each classification model on datasets augmented with synthetically generated damaged data at three different ratios (20%, 50%, and 80%). The performance of the models will be evaluated using confusion matrices and accuracy metrics, providing insights into the impact of synthetic data augmentation on classification accuracy and robustness.

In summary, the utilization of CNNs, SVMs, and XGBoost in this study, trained on datasets augmented with synthetically generated damaged data at varying ratios, represents a comprehensive and complementary approach to damage detection in RC columns subjected to fire-induced conditions. Each model offers unique strengths and capabilities, contributing to the overall efficacy and reliability of the classification task.

III. RESULTS

The classification performance of Convolutional Neural Networks (CNNs), Support Vector Machines (SVMs), and XGBoost models trained on datasets augmented with synthetically generated damaged data at three different ratios (20%, 50%, and 80%) was evaluated using confusion matrices. Each confusion matrix provides a detailed overview of the model's ability to classify healthy and damaged states of reinforced concrete (RC) columns subjected to fire-induced conditions. Here, we analyze and discuss the results obtained from the nine confusion matrices presented in Figures 4-6. In Figure 4, the confusion matrices depict the distribution of true positive (TP), true negative (TN), false positive (FP), and false negative (FN) predictions for CNNs across different ratios of synthetic data. Notably, CNNs consistently exhibit superior performance compared to SVMs and XGBoost, with higher accuracy metrics observed across all synthetic data ratios.

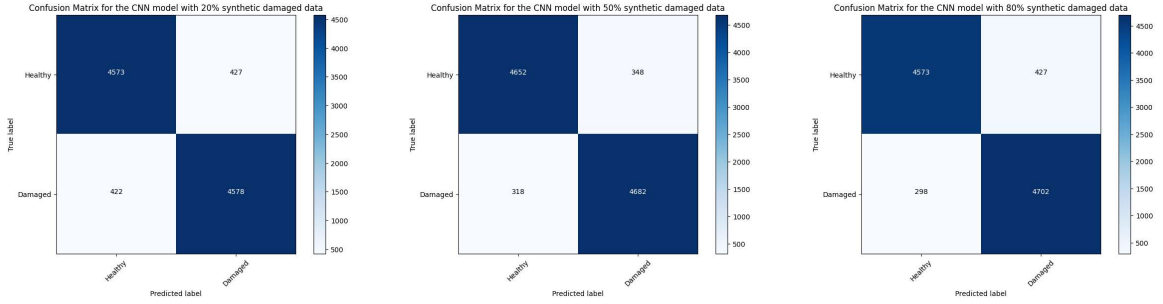


Figure 4. Confusion matrix for (a) %20 (b) %50 (c) %80 synthetic damaged data using CNN model

Similarly, in Figure 5, the confusion matrices illustrate the classification performance of SVMs across varying levels of synthetic data augmentation. While SVMs demonstrate commendable performance, particularly in scenarios with lower ratios of synthetic data, their accuracy tends to be slightly lower compared to CNNs. Nevertheless, SVMs offer valuable insights into damage detection, especially in situations where computational efficiency or interpretability is crucial.

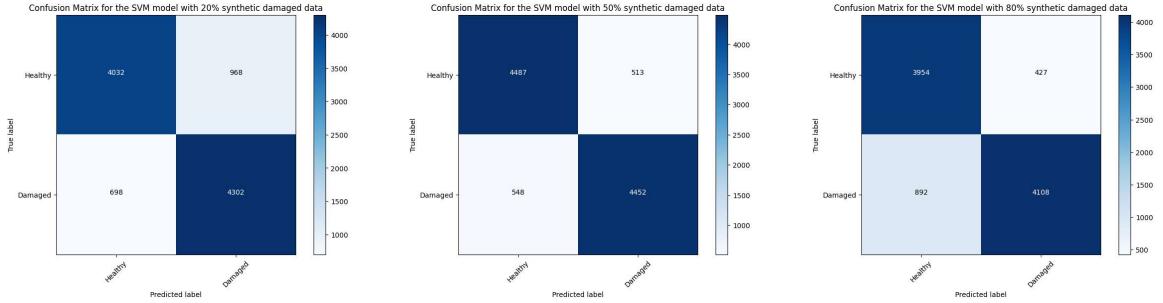


Figure 5. Confusion matrix for (a) %20 (b) %50 (c) %80 synthetic damaged data using SVM model

Figure 6 provides a comprehensive view of the classification results obtained from datasets augmented with synthetically generated damaged data for XGBoost models. Although XGBoost exhibits competitive

performance, it generally achieves lower accuracy compared to CNNs and SVMs, especially when trained on datasets with higher ratios of synthetic data. Nonetheless, XGBoost remains a valuable tool for damage detection, offering scalability, efficiency, and robustness to overfitting.

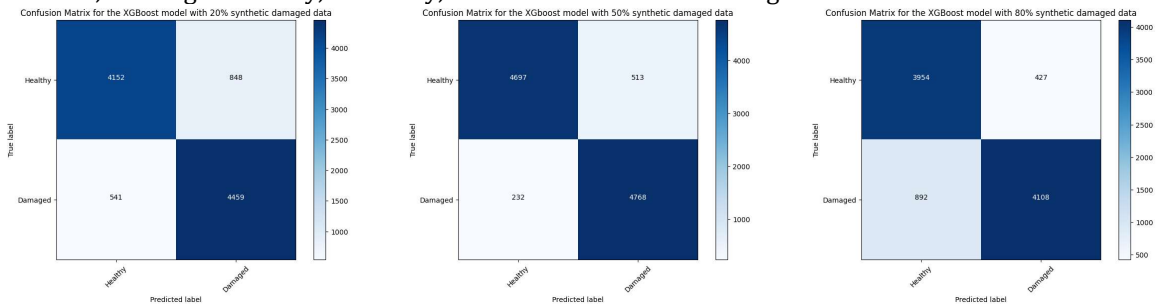


Figure 6. Confusion matrix for (a) %20 (b) %50 (c) %80 synthetic damaged data using XGBoost model

IV. Discussion

The results obtained from the evaluation of classification models trained on datasets augmented with synthetically generated damaged data highlight several key findings. Firstly, CNNs consistently outperform both SVMs and XGBoost, demonstrating superior accuracy and robustness in classifying the structural condition of RC columns subjected to fire-induced conditions. This superiority can be attributed to CNNs' ability to capture complex patterns and spatial dependencies present in acceleration signals.

Secondly, XGBoost generally performs better than SVMs, albeit with slightly lower accuracy compared to CNNs. While both XGBoost and SVMs offer valuable contributions to damage detection, XGBoost's ensemble learning approach enables it to capture complex relationships and interactions in the data, resulting in improved classification performance.

Lastly, an interesting observation is the inverse relationship between synthetic data percentage and classification accuracy across all models. As the percentage of synthetically generated damaged data increases, the accuracy of the models tends to decrease. This phenomenon suggests that while synthetic data augmentation enhances the diversity and representativeness of the training dataset, excessive augmentation may introduce noise or bias, thereby diminishing classification performance.

In conclusion, the results underscore the importance of data augmentation strategies and model selection in enhancing the accuracy and reliability of damage detection in RC columns subjected to fire-induced conditions. By leveraging CNNs, SVMs, and XGBoost, along with synthetic data augmentation techniques, this study contributes to advancing the field of structural health monitoring and enhancing the safety and resilience of infrastructure systems.

.

V. Inferences

The evaluation of classification models trained on datasets augmented with synthetically generated damaged data yields several key inferences:

1. **CNNs Outperform SVMs and XGBoost:** Convolutional Neural Networks (CNNs) consistently demonstrate superior performance compared to Support Vector Machines (SVMs) and XGBoost. CNNs' ability to capture intricate patterns and spatial dependencies in acceleration signals enables more accurate and robust damage detection in reinforced concrete (RC) columns subjected to fire-induced conditions.
2. **XGBoost Performs Better Than SVMs:** While XGBoost generally achieves lower accuracy compared to CNNs, it outperforms SVMs, particularly in capturing complex relationships and interactions in the data. XGBoost's ensemble learning approach contributes to improved classification performance, albeit with slightly lower accuracy than CNNs.
3. **Inverse Relationship Between Synthetic Data Percentage and Accuracy:** Across all models, an inverse relationship is observed between the percentage of synthetically generated damaged data and classification accuracy. While synthetic data augmentation enhances dataset diversity, excessive augmentation may introduce noise or bias, leading to decreased classification performance.
4. **Importance of Data Augmentation and Model Selection:** The results underscore the significance of data augmentation strategies and model selection in enhancing the accuracy and reliability of damage detection in RC columns subjected to fire-induced conditions. By leveraging CNNs, SVMs,

and XGBoost, along with synthetic data augmentation techniques, this study contributes to advancing structural health monitoring and improving the safety and resilience of infrastructure systems.

FUNDING

This work was supported by The Office of Scientific Research Projects, Ege University, Turkey [Grant Number : 26343]

REFERENCES

[1] S. Raza, M. K. I. Khan, S. J. Menegon, H.-H. Tsang, and J. L. Wilson, 'Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review', *Sustainability*, vol. 11, no. 11, p. 3208, Jun. 2019, doi: 10.3390/su11113208.

[2] M. Dalli and A. Soyluk, 'Damage Catalogue Software and the Role of Architecture & Architects: A Comprehensive Review', *MBUD*, pp. 22–40, Jan. 2024, doi: 10.30785/mbud.1317394.

[3] S. P. H. Boroujeni *et al.*, 'A comprehensive survey of research towards AI-enabled unmanned aerial systems in pre-, active-, and post-wildfire management'. arXiv, Jan. 04, 2024. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2401.02456

[4] Y. Gao, P. Zhai, and K. M. Mosalam, 'Balanced semisupervised generative adversarial network for damage assessment from low-data imbalanced-class regime', *Computer aided Civil Eng*, vol. 36, no. 9, pp. 1094–1113, Sep. 2021, doi: 10.1111/mice.12741.

[5] Y. Lu, M. Shen, H. Wang, X. Wang, C. van Rechem, and W. Wei, 'Machine Learning for Synthetic Data Generation: A Review'. arXiv, Jan. 01, 2024. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2302.04062

[6] E. Aktan, I. Bartoli, B. Glišić, and C. Rainieri, 'Lessons from Bridge Structural Health Monitoring (SHM) and Their Implications for the Development of Cyber-Physical Systems', *Infrastructures*, vol. 9, no. 2, p. 30, Feb. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9020030.

[7] O. Avci, O. Abdeljaber, S. Kiranyaz, M. Hussein, M. Gabbouj, and D. J. Inman, 'A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications', *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 147, p. 107077, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107077.

[8] Y. Wen, Md. Fashiar Rahman, H. Xu, and T.-L. B. Tseng, 'Recent advances and trends of predictive maintenance from data-driven machine prognostics perspective', *Measurement*, vol. 187, p. 110276, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110276.

[9] F. Luleci, F. Necati Catbas, and O. Avci, 'CycleGAN for undamaged-to-damaged domain translation for structural health monitoring and damage detection', *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 197, p. 110370, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2023.110370.

[10] F. Luleci, F. N. Catbas, and O. Avci, 'Generative Adversarial Networks for Labeled Acceleration Data Augmentation for Structural Damage Detection', 2021, doi: 10.48550/ARXIV.2112.03478.

[11] A. Jędrzejczyk, K. Firek, and J. Rusek, 'Convolutional Neural Network and Support Vector Machine for Prediction of Damage Intensity to Multi-Storey Prefabricated RC Buildings', *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4736, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15134736.

[12] I. Meftah, J. Hu, M. A. Asham, A. Meftah, L. Zhen, and R. Wu, 'Visual Detection of Road Cracks for Autonomous Vehicles Based on Deep Learning', *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1647, Mar. 2024, doi: 10.3390/s24051647.

[13] Eche Samuel Okem, Zamathula Queen Sikhakhane Nwokediegwu, Aniekan Akpan Umoh, Preye Winston Biu, Bartholomew Obehioye Obaedo, and Michael Sibanda, 'Civil engineering and disaster resilience: A review of innovations in building safe and sustainable communities', *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 11, no. 1, pp. 639–650, Jan. 2024, doi: 10.30574/ijsra.2024.11.1.0107.

[14] I. J. Goodfellow *et al.*, 'Generative Adversarial Networks', 2014, doi: 10.48550/ARXIV.1406.2661.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Borik Asit, Aktif Karbon, Atık Pirinç Kabuğu ve Lastik Tozları İçeren Poliüretan Köpüklerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Emrah Yılmaz[a]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye
* **Sorumlu Yazar:** emrahyilmaz@duzce.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, poliüretanın içerisine endüstriyel atıklardan lastik atığı tozu, tarımsal atıklardan pirinç kabuğu tozu, borik asit, aktif karbon ve borik asit ile pirinç kabuğu tozu karışımı farklı oranlarda ikame edilerek poliüretan sert köpükler sentezlenmiştir. İkame edilen malzemelerin poliüretanın mekanik özellikleri, yoğunluğu ve ısıl iletkenliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, borik asit ve pirinç kabuğu tozu kombinasyonunun diğer dolgu malzemelerine göre basma dayanımını daha az etkileyerek referans malzemeye yakın bir değer sağladığı tespit edilmiştir. Dolgu malzemelerinin kullanımı ile poliüretan köpüklerin yoğunluklarında yaklaşık %6 ile %10 arasında bir azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca, aktif karbonun sert poliüretan köpüklerin ısıl iletkenliği üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Özellikle borik asit ve pirinç kabuğu tozu karışımının ikamesi, bazı özelliklerde daha olumlu sonuçlar vermiştir. Bu çalışma, poliüretanın farklı ikame malzemelerle optimize edilebileceğini ve atıkların geri kazanım potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Poliüretan, Borik asit, Aktif karbon, Atık geri kazanımı.*

Investigation of Mechanical and Physical Properties of Polyurethane Foams Containing Boric Acid, Activated Carbon, Waste Rice Husk and Tire Powders

ABSTRACT

In this study, polyurethane rigid foams were synthesized by substituting tire waste powder from industrial wastes, rice husk powder from agricultural wastes, boric acid, activated carbon and a mixture of boric acid and rice husk powder in different ratios into polyurethane. The effects of substituted materials on the mechanical properties, density and thermal conductivity of polyurethane were investigated. According to the test results, it was determined that the combination of boric acid and rice husk powder affected the compressive strength less than other filling materials and provided a value close to the reference material. It has been observed that there is a decrease of approximately 6% to 10% in the density of polyurethane foams with the use of filling materials. Additionally, activated carbon was determined to have a limited effect on the thermal conductivity of rigid polyurethane foams. In particular, the substitution of boric acid and rice husk powder mixture gave more positive results in some properties. This study shows that polyurethane can be optimized with different substitute materials and that there is potential for recycling waste.

Keywords: *Polyurethane, Boric acid, Activated carbon, Waste recovery*

I. GİRİŞ

Poliüretan köpükler (PU köpükler), ısı yalıtım özellikleri, mekanik esneklikleri, hafif ve dayanıklı olmaları gibi birçok avantajlarından dolayı inşaat, otomotiv, beyaz eşya ve tekstil de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir malzemedir [1], [2]. Mükemmel yalıtım özelliklerine, sağlamlığa ve dayanıklılığa sahip olmaları, onları ısı yalıtımı, yastıklama malzemeleri ve paketleme gibi çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir [3], [4], [5], [6]

Mükemmel ısı yalıtım özellikleri ve kompozit sistemlerin bir parçasını oluşturabilme yeteneklerinden dolayı inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert poliüretan köpükler binalarda, soğutma sistemlerinde ve borularda yalıtım malzemesi olarak kullanılmakta olup mükemmel ısı yalıtım özellikleri sağlamakta ve enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır [7], [8]Bu köpükler, düşük ısı iletkenliği, yüksek

mukavemet-ağırlık oranı ve düşük nem emme kabiliyetleri sayesinde büyük değer taşımaktadır. Bu özellikler, onları inşaat sektöründe ısı yalıtımı uygulamaları için ideal bir malzeme haline getirir [9]

Ayrıca inşaat sektöründe ses yalıtımı özelliğinden dolayı poliüretan köpükler duvarların, tavanların ve zeminlerin ses yalıtımında kullanılarak binalarda ve endüstriyel ortamlarda akustik konforu arttırırlar [10] Ek olarak, poliüretan köpük atıkları, inşaat sektöründe alçı harçlarının üretimi gibi alanlarda yeniden kullanılarak, sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarına katkıda bulunabilir [11].

Sürekli artan küresel pazarıyla en çok kullanılan altıncı plastik olan poliüretanın Dünya genelinde toplam üretimi 2018 yılında 24 milyon metrik tona ulaştı ve her yıl %4 oranında artmaktadır [12]. Poliüretan köpüklerin gelecekte çeşitli endüstriler için farklı uygulama gereksinimlerine aşamalı olarak uyması için, köpüklerin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirirken aynı zamanda sağlık ve çevresel etkilerini büyük ölçüde azaltma ihtiyacı vardır [13], [14], [15]

Poliüretan köpüklerin mekanik özelliklerini geliştirmek için nanokil, uçucu kül, biyokömür ve doğal lifler gibi çeşitli dolgu malzemeleri araştırılmıştır [16], [17], [18]Bu dolgu maddeleri, basınç dayanımı, termal kararlılık ve yoğunluk gibi özellikleri iyileştirme potansiyeline sahiptir ve bu sayede köpüklerin genel mekanik performansının artırılmasına katkıda bulunmuştur.

Ek olarak, poliüretan köpüklerin çevresel etkisini azaltırken termo-mekanik özelliklerini geliştirmek için vermikülit, silika, alümina ve kalsiyum karbonat gibi dolgu malzemelerinin eklenmesi de araştırılmıştır [19], [20], [21], [22]. Bu dolgu malzemeleri, çevre dostu alternatifler sunmak ve genel performanslarını artırmak suretiyle poliüretan köpüklerin sürdürülebilirliğini artırmaya katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, poliüretanın içerisine endüstriyel atıklardan lastik atığı, tarımsal atıklardan pirinç kabuğu tozu, borik asit, aktif karbon ve borik asit ile pirinç kabuğu tozu karışımı farklı oranlarda ikame edilerek poliüretan köpükler sentezlenmiş ve bu köpüklerin mekanik özellikleri, yoğunluğu ve ısıl iletkenliği araştırılmıştır.

II. MATERYAL METOT

A. Kimyasallar ve Dolgu Malzemeleri

Poliol Karışımı (Kımrıgıd RD 057) ve İzosiyanat (Izokım RD 001) Kimteks Poliüretan San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan pirinç kabuğu tozu (PK) Erdoğanlar Gıda San. ve Tic. LTD. ŞTİ.'den ve lastik atığı tozu (LA) Kahya Rejenere Kauçuk ve Lastik Tozu İmalatı Ltd. Şti.'den temin edilmiş ve kalınlıkları 50 ila100 mikron arasındadır. Bu çalışmada Bu çalışmada, Tekkim Kimya Sanayi Ltd. Şti.'den temin edilen aktif karbon (AK) ve Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'den temin edilen borik asit kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan dolgu malzemelerinin görüntüleri Şekil 1'de sunulmaktadır.



(a) Pirinç kabuğu tozu (b) Lastik atığı tozu (c) Borik asit (d) Aktif karbon

Şekil 1. Dolgu malzemelerinin görüntüleri

B. Köpüklerin Hazırlanması

Bu çalışmada, Poliol/izosiyanat karışım oranları optimum performans elde edebilmek için kütlece 100/152 olarak sabit tutulmuştur. Köpüğün homojen dağılımı için hammadde sıcaklıkları 20-22 °C arasında sabit tutulmuştur. Poliol içinde ağırlıkça %5 oranında PK, LA, BA, PK+BA ve %2 oranında AK içeren sert poliüretan köpükler hazırlandı. Dolgulu sert poliüretan köpükler, laboratuvar ortamında 20°C sıcaklıkta hazırlanmıştır. Poliol/dolgu maddesi süspansiyonu, mekanik bir karıştırıcı kullanılarak 3000 rpm'de 30 saniye süreyle karıştırıldı. Ardından, poliol/dolgu karışımına izosiyanat ilave edilerek mekanik karıştırıcıda 3000 rpm hızında 10 sn daha karıştırılmıştır.

Elde edilen kompozit karışımlar (poliol/dolgu maddesi/izosiyanat karışımı) uzunluğu 30 cm, genişliği 30 cm ve kalınlığı 10 cm olan kalıbın içeresine dökülerek 40°C'de ısıtmalı pres altında 30 dakika bekletilerek köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Dolgu malzemelerini içeren sert poliüretan köpükler

Tüm köpükler, polimerleşme reaksiyonunu tamamlaması için 24 saatlik bir kürlenme süresinde oda koşullarında bekletilmiştir. Bu çalışmada kullanılan formülasyonlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. PU/Dolgu Köpüklerinin Hazırlanmasında Kullanılan Formülasyonlar

Malzemeler	**Malzeme içeriği (wt %)**		
Dolgu	0	2	5
Poliol	39.68	39.37	38.91
İzosiyanat	60,32	58.63	56,09

Çalışmayı yürütürken kullanılan materyalleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklayınız. Farklı kaynaklardan yaptığınız alıntılar kaynakça verilmeli ve kaynak gösterilmelidir. Çalışmayı yürütürken kullanılan materyalleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklayınız. Farklı kaynaklardan yaptığınız alıntılar kaynakça verilmeli ve kaynak gösterilmelidir. Çalışmayı yürütürken kullanılan materyalleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklayınız. Farklı kaynaklardan yaptığınız alıntılar kaynakça verilmeli ve kaynak gösterilmelidir.

C. Karakterizasyon Çalışmaları

Yoğunluk Belirleme

PU/dolgu köpüklerin görünür yoğunluğu ASTM D-1622 standardına göre belirlenmiştir. Ölçümler, her bir köpükten 10 × 10 × 10 mm boyutlarında dört örnek üzerinde gerçekleştirilmiş.

Mekanik Özellikler

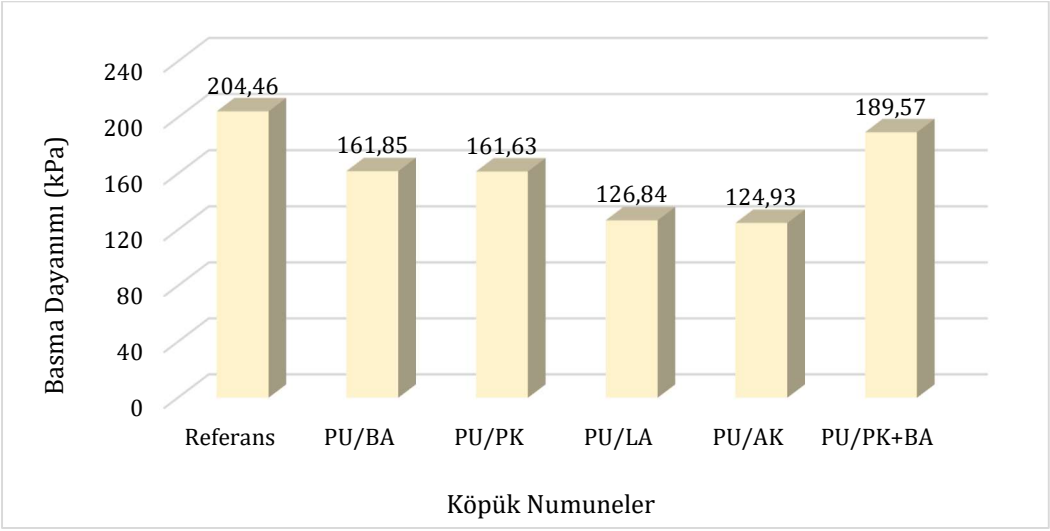
Basma testleri, köpüğün yükselme yönüne dik bir şekilde ASTM D1621'e göre gerçekleştirilmiştir. Ölçümler her durum için dört numune ile tekrarlanmıştır.

Termal İletkenlik Ölçümleri

Hazırlanan köpüklerin termal iletkenliği ölçümlerinin tamamı ASTM C518'e göre gerçekleştirilmiştir. Bu testler köpürme yönüne dik yönde yapılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dolgu malzemeleri eklenerek üretilen poliüretan köpüklerinin basma dayanımları karşılaştırılmıştır. Pirinç kabuğu tozu (PK), lastik atığı tozu (LA), aktif karbon (AK), borik asit (BA) ve borik asit ile pirinç kabuğu tozu karışımının (BA+PK) basınç dayanımlarının referans PU köpüğe kıyasla nasıl değiştiği Şekil 3'te incelenmiştir.



Şekil 3. PU Köpüklerin Basma Dayanımları Üzerinde Dolgu Malzemelerinin Etkisi

Şekil 3 incelendiğinde, referans PU köpüğün basma dayanımı 204,46 kPa iken, borik asit (BA) ikame edilmesi ile basma dayanımında %20,8'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, pirinç kabuğu ve lastik atığı tozları ikame edilerek üretilen PU köpüklerin basma dayanımı sırasıyla %20,9 ve %37,9 oranlarında azalma göstermektedir. Poliüretan içerisine aktif karbon ikamesi yapıldığında basma dayanımı %38,9 oranında azalarak 124,93 kPa'ya düşmüştür. Poliüretan içerisine ikame edilen malzemelere bağlı olarak basınç dayanımının %7 ila %40 arasında azaldığı belirlenmiştir.

Öte yandan, BA ve PK bir arada kullanıldığında basma dayanımı, %7,2 oranında azalarak referans malzemeye oldukça yakın bir değerde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, borik asit ve pirinç kabuğu tozu kombinasyonunun, diğer dolgu malzemeleri eklenmiş örneklerle kıyaslandığında basma dayanımını daha az etkilediği ve referans değere daha yakın performans elde etmesini sağlamıştır.

Dolgusuz poliüretan (PU) köpüğün ve farklı dolgu malzemeleri ikame edilmiş PU köpüklerin yoğunlukları ve bu yoğunluklardaki azalma oranlarını Tablo 2'de verilmiştir.

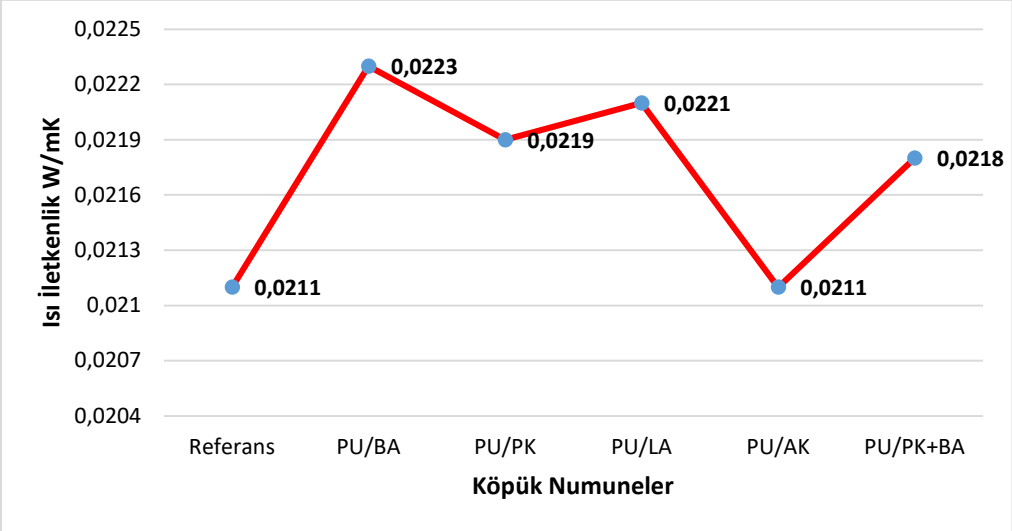
Köpük Örnekleri	Dolgu içeriği (wt %)	Yoğunluk (kg/m3)	Azalma oranı (%)
Dolgusuz PU	0	35.55	-
PU/LA	5	33.45	5,9
PU/PK	5	32.10	9,7
PU/BA	5	32.11	9,6
PU/AK	2	32.04	9,8
PU/PK+BA	5 (2.5+2.5)	32.69	8

Tablo 2. Poliüretan Köpüklerde Farklı Dolgu Malzemeleri Kullanımının Yoğunluk Üzerine Etkisi

Tabla 2'ye göre, poliüretan içerisine %5 oranında lastik atığı tozu ikame edildiğinde %5,9'luk bir azalmayla yoğunluk 33.45 kg/m^{3}'e düşmüştür. Pirinç kabuğu tozu ve borik asit ikame edildiğinde ise sırasıyla %9,7 ve %9,6'lık bir azalmayla yoğunluklar 32.10 kg/m^3 ve 32.11 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %2 oranında aktif karbon ikame edildiğinde %9,8'lik en büyük azalma görülmüş ve yoğunluk 32.04 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Borik asit ve pirinç kabuğu tozunun karıştırılarak ikame edildiğinde (PU/PK+BA) ise, toplamda %8'lik bir azalmayla yoğunluk 32.69 kg/m^{3}'e düşmüştür. Her dolgu tipi (LA, PK, BA ve AK) için, köpük yoğunluğunun genel eğilimi dolgu ikamesi ile yaklaşık %6 ile %10 arasında bir azalma tespit edilmiştir. PU köpüklerin yoğunluklarındaki bu azalma malzemelerin hafiflemesine neden olmaktadır.

LA, PK, BA ve AK dolgu malzemeleri ile ikame edilmiş poliüretan (PU) köpüklerin ısıl iletkenlik değerlerindeki değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Dolgu malzemelerinin PU köpüklerin ısıl iletkenlik değerleri üzerine etkileri

Şekil 4'te görüldüğü gibi, Pirinç kabuğu tozu, lastik atığı tozu, aktif karbon, borik asit ve borik asit ile pirinç kabuğu tozu karışımı dolgulu köpükler için dolgusuz PU köpüklere kıyasla %3 ila %6 arasında bir artış gözlemlenmiştir. Borik asit dolgulu köpüklerin ısıl iletkenliği daha yüksek olmasına rağmen, aktif karbonun sert PU köpüklerin ısıl iletkenliği üzerinde zayıf bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Borik asit (BA) ve pirinç kabuğu tozu (PK) ikameli PU köpüklerin ısıl iletkenlik değerleri referans malzemeye göre sırasıyla %6 ve % oranında arttığı görülmektedir. Ancak, borik asit ve pirinç kabuğu tozu

bir arada kullanılarak hazırlanan PU köpüklerde ısıl iletkenlik, referans malzemenin değerine göre %3 oranında artmıştır, bu kombinasyon referans malzemeye daha yakın bir ısıl iletkenlik göstermektedir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, pirinç kabuğu tozu, lastik atığı tozu, borik asit ve aktif karbon sert poliüretan köpükler üretmek için dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu dolgu malzemelerinin köpüklerin mekanik özellikleri, yoğunluğu ve ısıl iletkenliği özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Borik asit ve pirinç kabuğu tozunun kombinasyonu, basma dayanımında %7,2'lik bir azalmayla, diğer dolgulara kıyasla referans malzemeye en yakın performansı sunmuştur. Dolgu malzemelerinin eklenmesi, PU köpüklerin yoğunluğu her dolgu maddesi türü için yaklaşık %6 ila %10 oranında azalmıştır. Yoğunluktaki bu azalma, malzemelerin daha hafif olmasına katkıda bulunur ve bu da onları ağırlığın kritik bir faktör olduğu uygulamalar için daha uygun hale getirmektedir. Aktif karbon, PU köpüklerin termal iletkenliği üzerinde daha az önemli bir etkiye olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, borik asit ve pirinç kabuğu tozu kombinasyonunun, PU köpüklerin bazı özelliklerinde diğer dolgu malzemelerine göre daha olumlu sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda, PU köpüklerin üzerinde borik asitin farklı ikame malzemelerle optimize edilmesi için daha detaylı çalışmaların yapılması önerilmekle birlikte tarımsal ve endüstriyel atıkların geri kazanım potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Kimteks Poliüretan San. ve Tic. A.Ş.'ye poliol ve izosiyanat sağladığı için içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, şirketin Ar-Ge mühendisi Dr. Emre Baştürk'e köpük üretimi ve testlerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

[1] E. Mester *et al.*, "Exploring the Potential to Repurpose Flexible Moulded Polyurethane Foams as Acoustic Insulators," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.3390/polym14010163.

[2] B. Aydoğan and N. Usta, "Effects of dolomite and intumescent flame retardant additions on thermal and combustion behaviors of rigid polyurethane foams," *J Appl Polym Sci*, vol. 140, no. 16, 2023, doi: 10.1002/app.53739.

[3] C. Yang, L. Fischer, S. Maranda, and J. Worlitschek, "Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways," *Energy and Buildings*, vol. 87. 2015. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.10.075.

[4] Y. Li *et al.*, "Effect of expandable graphite particle size on the flame retardant, mechanical, and thermal properties of water-blown semi-rigid polyurethane foam," *J Appl Polym Sci*, vol. 131, no. 3, 2014, doi: 10.1002/app.39885.

[5] R. H. Krämer, M. Zammarano, G. T. Linteris, U. W. Gedde, and J. W. Gilman, "Heat release and structural collapse of flexible polyurethane foam," *Polym Degrad Stab*, vol. 95, no. 6, 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.02.019.

[6] N. V. Gama, A. Ferreira, and A. Barros-Timmons, "Polyurethane foams: Past, present, and future," *Materials*, vol. 11, no. 10. 2018. doi: 10.3390/ma11101841.

[7] M. Günther, A. Lorenzetti, and B. Schartel, "Fire phenomena of rigid polyurethane foams," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 10, 2018, doi: 10.3390/polym10101166.

[8] M. E. Li *et al.*, "Hierarchically porous SiO2/polyurethane foam composites towards excellent thermal insulating, flame-retardant and smoke-suppressant performances," *J Hazard Mater*, vol. 375, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.04.065.

[9] A. Paruzel, S. Michałowski, J. Hodan, P. Horák, A. Prociak, and H. Beneš, "Rigid Polyurethane Foam Fabrication Using Medium Chain Glycerides of Coconut Oil and Plastics from End-of-Life Vehicles," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 5, no. 7, 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b01197.

[10] P. Parcheta-Szwindowska, K. Kopczyńska, M. J. Kordyzon, and J. Datta, "Fabrication and Characterization of Green Polyurethane Foams with Enhanced Vibration Damping Capability," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 11, no. 39, 2023, doi: 10.1021/acssuschemeng.3c01751.

[11] I. S. Vicario, L. A. Cuenca-Romero, S. G. González, V. C. Carpintero, and Á. R. Saiz, "Design and characterization of gypsum mortars dosed with polyurethane foam waste PFW," *Materials*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/ma13071497.

[12] B. Liu *et al.*, "Opportunities in Closed-Loop Molecular Recycling of End-of-Life Polyurethane," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 11, no. 16, 2023, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c07422.

[13] M. Urgun-Demirtas, D. Singh, and K. Pagilla, "Laboratory investigation of biodegradability of a polyurethane foam under anaerobic conditions," *Polym Degrad Stab*, vol. 92, no. 8, 2007, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.04.013.

[14] S. Matsumura, Y. Soeda, and K. Toshima, "Perspectives for synthesis and production of polyurethanes and related polymers by enzymes directed toward green and sustainable chemistry," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 70, no. 1. 2006. doi: 10.1007/s00253-005-0269-2.

[15] S. R. Oke, J. A. Omotoyinbo, and K. K. Alaneme, "Water absorption characteristics of polyester matrix composites reinforced with oil palm ash and oil palm fibre," *Usak University Journal of Material Sciences*, vol. 2, no. 2, 2013, doi: 10.12748/uujms.201324253.

[16] G. Harikrishnan, T. U. Patro, and D. V. Khakhar, "Polyurethane foam - Clay nanocomposites: Nanoclays as cell openers," *Ind Eng Chem Res*, vol. 45, no. 21, 2006, doi: 10.1021/ie0600994.

[17] S. M. Husainie, S. U. Khattak, J. Robinson, and H. E. Naguib, "A Comparative Study on the Mechanical Properties of Different Natural Fiber Reinforced Free-Rise Polyurethane Foam Composites," *Ind Eng Chem Res*, vol. 59, no. 50, 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c04006.

[18] A. R. Tarakcilar, "The effects of intumescent flame retardant including ammonium polyphosphate/pentaerythritol and fly ash fillers on the physicomechanical properties of rigid polyurethane foams," *J Appl Polym Sci*, vol. 120, no. 4, 2011, doi: 10.1002/app.33377.

[19] Q. Zhang, X. Lin, W. Chen, H. Zhang, and D. Han, "Modification of rigid polyurethane foams with the addition of nano-SiO2 or lignocellulosic biomass," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/polym12010106.
[20] K. Uram, M. Kurańska, J. Andrzejewski, and A. Prociak, "Rigid polyurethane foams modified with biochar," *Materials*, vol. 14, no. 19, 2021, doi: 10.3390/ma14195616.
[21] M. Kuźnia *et al.*, "Fly ash as an eco-friendly filler for rigid polyurethane foams modification," *Materials*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216604.
[22] K. Miedzińska, S. Członka, A. Strąkowska, and K. Strzelec, "Vermiculite filler modified with casein, chitosan, and potato protein as a flame retardant for polyurethane foams," *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 19, 2021, doi: 10.3390/ijms221910825.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Moment Çerçeve Çelik Bir Yapının Geleneksel Yöntemlerle ve Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör Sistemiyle İnşasının Maliyet Açısından Karşılaştırılması

Batuhan Bayar[a], Orkun Yılmaz[b]*

[a]Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b]Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** batuhan.bayar@std.yildiz.edu.tr

ÖZET

Yapı mühendisliği alanında sismik izolatörlerin, yapılara etkiyen deprem yüklerinin belli bir oranda sönümlenmesi ve yapı periyodunu artırarak yapıya etkiyen deprem yüklerinin azaltılması amacıyla kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma ile deprem kuşağında bulunan ülkemizde günden güne yaygınlaşan çok katlı çelik binaların deprem performanslarının iyileştirilmesi, dolayısıyla da yapı inşaat zamanının ve yapı maliyetinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 10 katlı moment çerçeve sistemden oluşan çelik bir yapının, seçilen kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü sistem ve geleneksel sistem ile yapılmış analizleri, inşaat maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Analizlerde izolasyon birimi, tekrarlama periyodu 2475 yıl ve 475 yıl olan deprem yer hareketine göre ölçeklenmiş toplam 22 farklı deprem çiftiyle beraber zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Üst yapı ise hem kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü sistemde hem de geleneksel sistemde mod birleştirme yöntemine göre doğrusal olarak analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör sistemiyle inşa edilen çelik yapı maliyetinin, geleneksel sistemlerle inşa edilen çelik yapı maliyetine karşı avantajları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Çelik yapı, sismik izolatör, yapım maliyeti*

Cost Comparison of Construction of a Steel Structure with Traditional Methods and Lead Rubber Bearing Isolator System

Batuhan Bayar[a], Orkun Yılmaz[b]*

[a]Yıldız Technical University, Faculty of Civil Engineering, Civil Engineering Department, İstanbul/Türkiye.
[b] Yıldız Technical University, Faculty of Civil Engineering, Civil Engineering Department, İstanbul/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** batuhan.bayar@std.yildiz.edu.tr

ABSTRACT

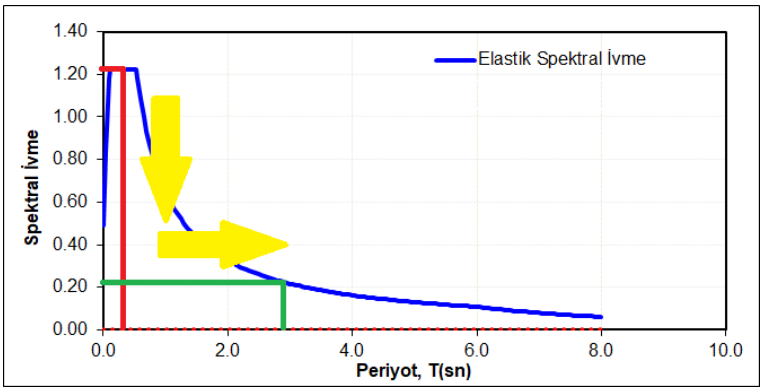
In the field of structural engineering, the use of seismic isolators is increasing day by day in order to dampen the earthquake loads acting on the structures and to reduce the earthquake loads acting on the structure by increasing the period of the structure. In this study, it is aimed to improve the earthquake performance of multi-storey steel buildings, which are becoming more and more common in our country, which is located in an earthquake zone, and thus optimize the construction cost. The analyses of a 10-storey steel structure consisting of a moment frame system with the selected lead rubber bearing (LRB) system and the conventional system are compared in terms of construction cost. In the analyses, the isolation unit is analyzed by nonlinear time history with a total of 22 different earthquake pairs scaled according to the earthquake ground motion with repetition periods of 2475 years and 475 years. The superstructure was analyzed linearly according to the response spectrum for both the LRB system and the conventional system. As a result, the advantages of the cost of the steel structure constructed with the LRB system over the cost of the steel structure constructed with conventional systems are discussed.

Keywords: *Steel structure, seismic isolation, construction cost*

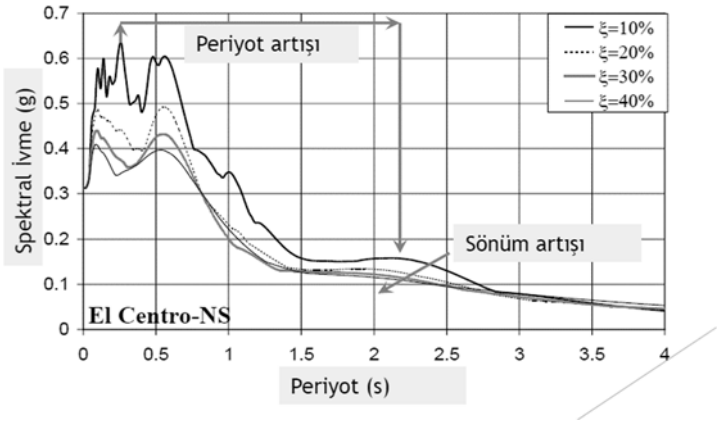
I. GİRİŞ

Sismik izolasyonun ana felsefesi üst yapı doğal titreşim periyodunu uzatarak, yapı hakim periyodunu rezonans aralığının dışına taşımaktır. Böylece yapıya etkiyecek spektral ivme değerlerinde düşüş olacaktır ve yapıya etkiyen yatay kuvvetler bu oranda azalacaktır. Şekil 1'de kırmızı ile gösterilen 0.3 saniye periyoda karşılık gelen ivme 1.2g iken, yeşil ile gösterilen 3 saniye periyoda karşılık gelen spektral ivme yaklaşık olarak 0.2g'dir. Görüldüğü üzere yapı periyodunun artması durumunda spektral ivmeler azalmaktadır. İzolatör rijitliğinin, üst yapının rijitliğinden düşük olması sebebiyle üst yapı rijit cisim hareketi yapacaktır. Bu da yatay kuvvet temelli ötelemelerin önemli bir kısmının yalıtım arayüzünde ortaya çıkmasını ve üst yapıda göreli kat ötelemelerinin azalmasını sağlayacaktır. Ayrıca izolasyon sisteminin kendi içindeki sönümü sayesinde enerjinin bir kısmı sönümlenerek üst yapıya aktarılan enerji miktarı sınırlandırılır. Şekil 2'de de görüldüğü üzere %10'dan %40'a kadar sönümlü spektral ivme-periyot grafiğinde sönüm oranı arttıkça spektral ivme oranları azalmaktadır.

Bu çalışma kapsamında kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü 10 katlı moment çerçeve çelik bir yapı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [1] kapsamında zaman tanım alanında deprem yöntemiyle analiz edilmiş ve geleneksel yöntemlerle inşa edilen aynı yapının yapım maliyetleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Yapı periyodu ve spektral ivme ilişkisi



Şekil 2. Sönüm ve spektral ivme ilişkisi [2]

II. MATERYAL METOT

Analiz edilen yapı için hesap modellerinde seçilen yapısal çeliğin sınıfı S275JR'dir. Yapının modellenmesi, analizi ve tasarımı CSI SAP2000 [3] genel sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Tasarım yöntemi olarak AISC 360-10 [4] yönetmeliği ve burkulma boyu yöntemi kullanılmıştır. Seçilen 11 adet deprem çifti kaydı Pasifik Deprem Araştırma Merkezi (PEER) [5] uygulamasından elde edilmiştir. Depremlerin tasarım spektrumlarına göre ölçeklendirilmesi ise Seismosoft Seismomatch [6] programı ile yapılmıştır.

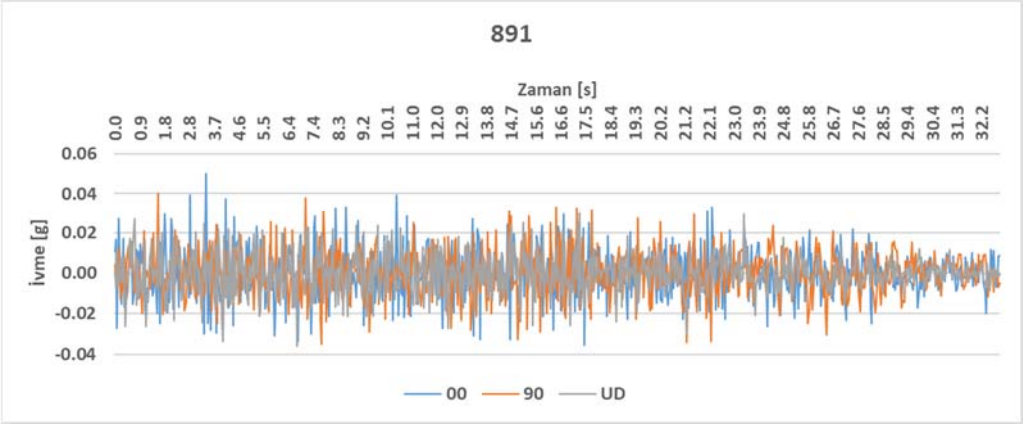
A. Deprem Kayıtları

Yapı analizlerinde ve tasarımında gerçek zamanlı deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları

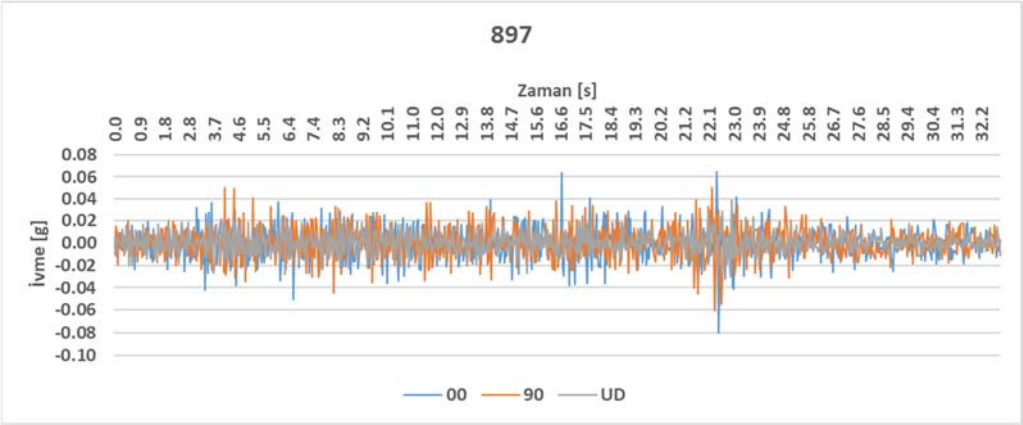
ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır [1]. Bu kapsamda analizlerde kullanılacak 11 adet deprem çifti kaydına ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1'de verilen %5-95 deprem enerjisinin %5'i ile %95'inin oluştuğu anlamlı süreyi, mekanizma depremin odak mekanizmasını (ss: strike slip, doğrultu atımlı fay), R_{jb} seçilen konumun fay kırığına yatay uzaklığını, R_{rup} seçilen konumun fay kırığına dik uzaklığını, V_{S30} ise zeminin üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızını ifade etmektedir. V_{S30} değeri ZC zemin sınıfının karşılığı olarak 360-760 m/s aralığında seçilmiştir. Tablo 1'de verilen ilk 3 deprem kaydı olan 891, 897 ve 1160 depremlerine ait ölçeklendirilmemiş yatay bileşenlerine ve düşey bileşenine ait ivme-zaman grafikleri Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Seçilen deprem kayıtları TBDY-2018'de tariflenen kurallar takip edilerek Şekil 6'daki yatay elastik tasarım ivme spektrumlarına göre ölçeklendirilmiştir. DD1 deprem düzeyine ait ölçeklendirilmiş yatay deprem bileşenleri Şekil 7'de, DD2 deprem düzeyine ait ölçeklendirilmiş yatay deprem bileşenleri ise Şekil 8'de gösterilmiştir. TBDY-2018 uyarınca "Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır." [1] koşulu DD1 deprem düzeyi için Şekil 9'da ve DD2 deprem düzeyi için Şekil 10'da gösterilerek sağlanmıştır.

Tablo 1. Seçilen deprem kayıtları

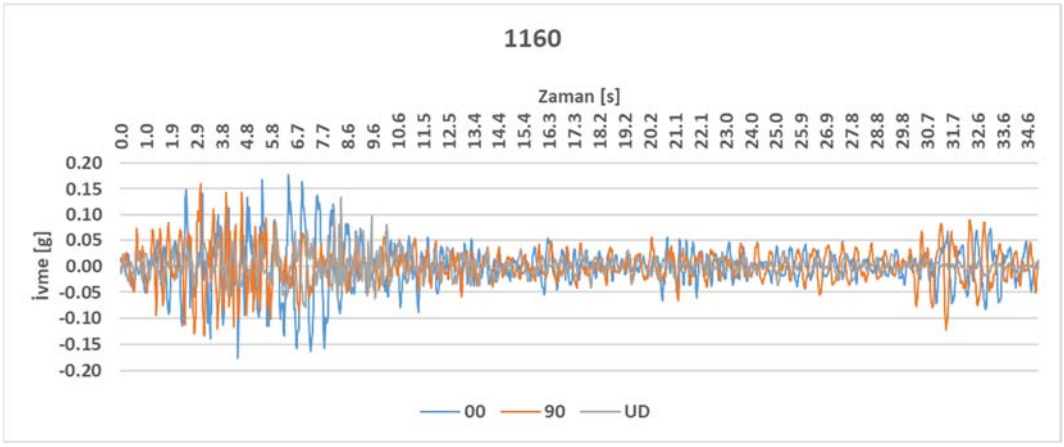
Kayıt	% 5-95 [s]	Deprem İsmi	Yıl	Büyüklük	Mekanizma	R_{jb} [km]	R_{rup} [km]	V_{S30} [m/s]
891	31.7	Landers	1992	7.28	SS	50.85	50.85	659.09
897	30.9	Landers	1992	7.28	SS	41.43	41.43	635.01
1160	34.3	Kocaeli	1999	7.51	SS	53.34	55.48	386.75
1164	38	Kocaeli	1999	7.51	SS	49.66	51.95	595.20
1166	19.5	Kocaeli	1999	7.51	SS	30.73	30.73	476.62
1616	20.5	Düzce	1999	7.14	SS	23.41	23.41	517.00
1619	16.4	Düzce	1999	7.14	SS	34.30	34.30	535.24
1620	26.4	Düzce	1999	7.14	SS	45.16	45.16	411.91
1627	20.7	Çaldıran	1976	7.21	SS	50.78	50.82	432.58
1762	26.7	Hector Mine	1999	7.13	SS	41.81	43.05	382.93
1785	18.1	Hector Mine	1999	7.13	SS	54.68	54.68	388.63



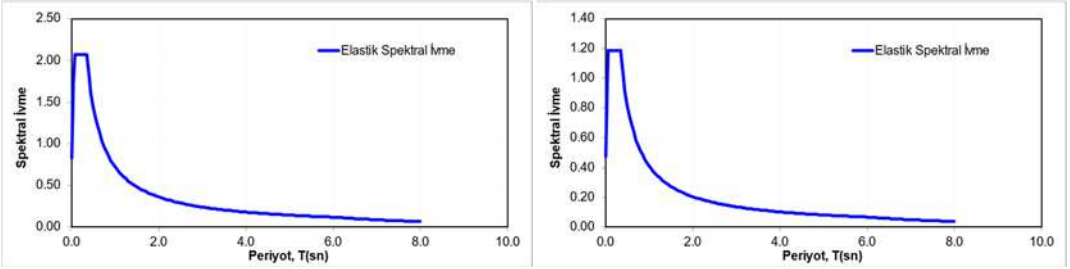
Şekil 3. 891 depremi ivme-zaman grafiği



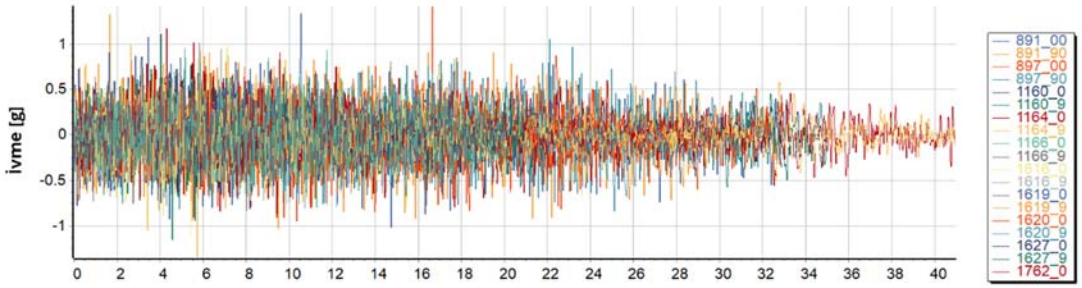
Şekil 4. 897 depremi ivme-zaman grafiği



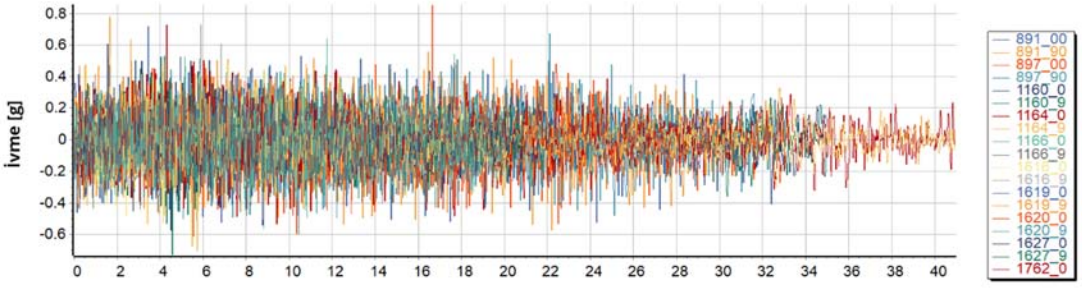
Şekil 5. 1160 depremi ivme-zaman grafiği



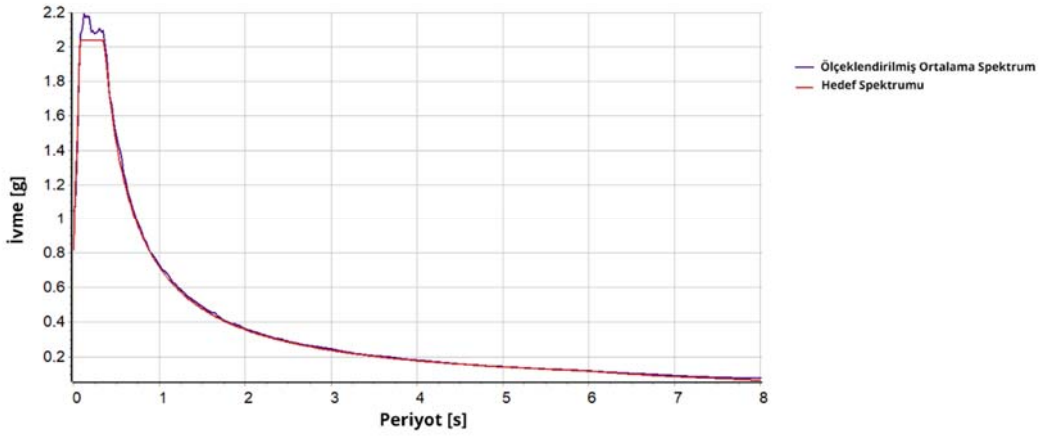
Şekil 6. DD1 ve DD2 yatay elastik tasarım spektrumları



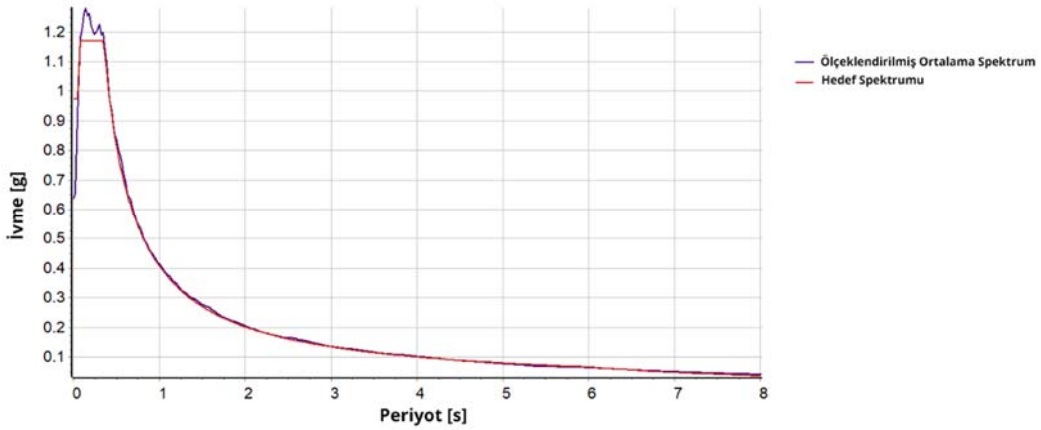
Şekil 7. DD1 depremine göre ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları



Şekil 8. DD2 depremine göre ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları



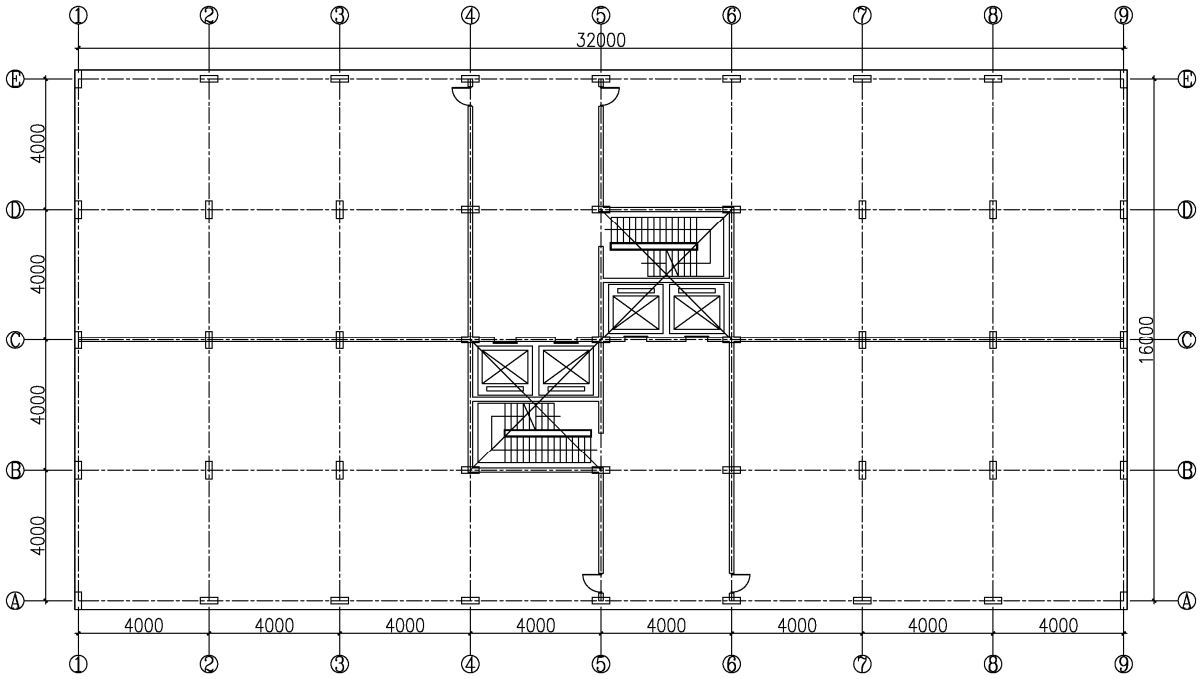
Şekil 9. DD1 depremine göre ölçeklendirilmiş deprem ivme spektrumlarının ortalaması ile DD1 tasarım spektrumu



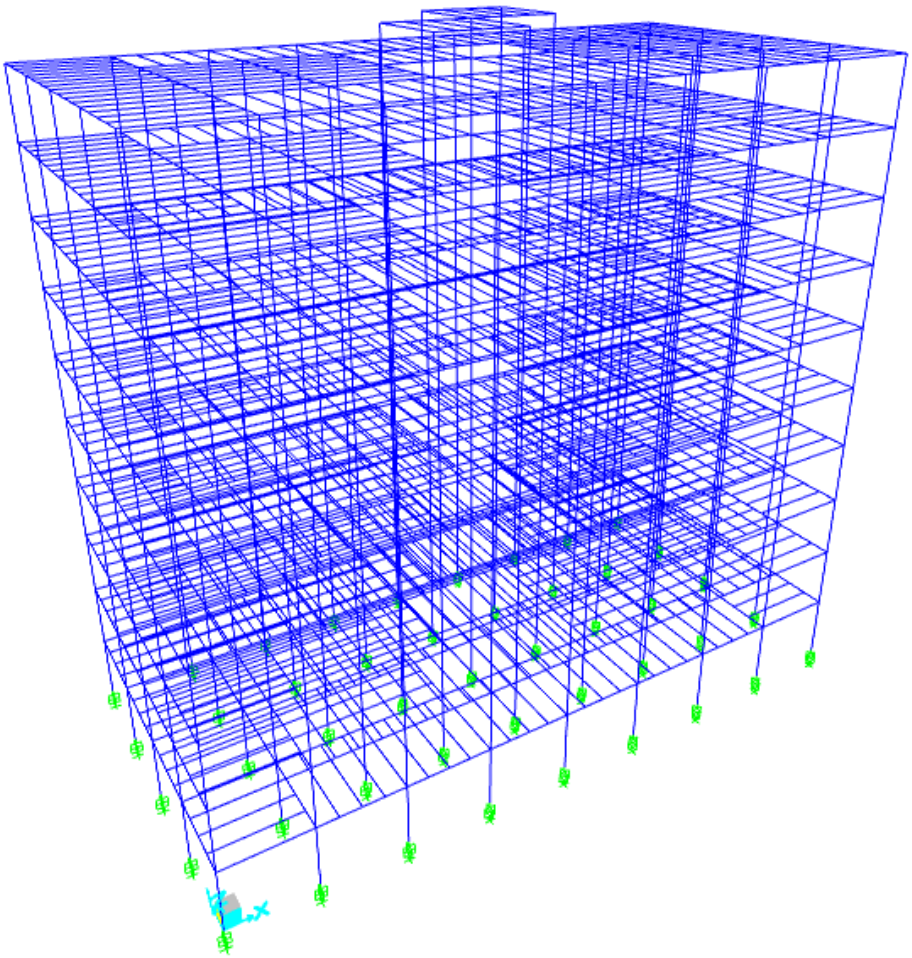
Şekil 10. DD2 depremine göre ölçeklendirilmiş deprem ivme spektrumlarının ortalaması ile DD2 tasarım spektrumu

B. İncelenen Yapı Modeli

İncelenen yapı Şekil 11'de gösterilen tipik kat planı doğrultusunda her biri 4 metre aks aralığına sahip 4*8 açıklıktan oluşmaktadır. Kat yüksekliği her katta aynı olup 3'er metredir. Dış boyutları 16*32 metre ve toplam 512 m^2 oturum alanına sahiptir. Toplam 10 adet normal kat ve çatı üstünde asansör makine dairesi bulunmaktadır. Kullanım amacı ofis olup lokasyon olarak Merter/İstanbul seçilmiştir. Bu bilgiler dahilinde yapının analitik modeli CSI SAP2000 programı ile üç boyutlu olarak Şekil 12'deki gibi modellenmiştir.



Şekil 11. Yapıya ait tipik kat planı



Şekil 12. Yapıya ait analitik model

C. İzolatör Sisteminin Seçilmesi

Yapılan analizler sonucu ankastre mesnetli modelden alınan maksimum mesnet reaksiyonlarına göre izolatör imalatçısı olan DIS [7] firması kataloglarından ön boyutlandırma olarak Tablo 2'deki özelliklerde izolatör sistemi seçilmiştir.

Tablo 2. Seçilen izolatörün mekanik özellikleri

Geometri=	Dairesel	-	İzolatör geometrisi
Sertlik=	60	-	Kauçuk malzemenin sertliği
Per. Hedefi=	SH	-	Yapı performans hedefi
Dep. Yöntemi=	MBY	-	Deprem yükü yöntemi
d=	32	m	Yapı planında uzun doğrultu
b=	16	m	Yapı planında kısa doğrultu
e=	5	%	Dışmerkezlik
Adet=	45	-	Yalıtım birimi adedi
$W_{(G+nQ)}$=	46693	kN	Binanın deprem sırasındaki toplam kütleye karşılık gelen ağırlığı
Q=	0	kN	Azaltılmış hareketli yük
$S_{DS(DD-1)}$=	2.04	-	DD-1 deprem düzeyi için kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{D1(DD-1)}$=	0.717	-	DD-1 deprem düzeyi için 1 saniye periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{DS(DD-2)}$=	1.172	-	DD-2 deprem düzeyi için kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{D1(DD-2)}$=	0.406	-	DD-2 deprem düzeyi için 1 saniye periyot tasarım spektral ivme katsayısı
D=	950	mm	İzolatör dış çapı
B=	950	mm	Çelik plaka ile yapışmış elastomer levha çapı
B_L=	100	mm	Kurşun çekirdek çapı
τ_{yp}=	10	N/mm^2	Kurşun malzemenin akma gerilmesi
G_v=	0.40	N/mm^2	Kauçuk malzemenin kayma modülü
H=	585	mm	Yalıtım biriminin toplam yüksekliği
t_e=	10.0	mm	Elastomer katman kalınlığı
P_e=	40	-	Elastomer katman adedi
T_r=	585	mm	Toplam elastomer kalınlığı
K=	2068.5	N/mm^2	Kauçuk malzemenin hacim modülü
t_e=	5	mm	Çelik plaka katman kalınlığı
P_e=	39	-	Çelik plaka katman adedi
A_p=	7854	mm^2	Kurşun çekirdek alanı
A_r=	700968	mm^2	Tek bir elastomer kat. çelik plaka ile yapışmış yüke maruz yüzey alanı
S=	23.49	-	Elastomer yalıtım birimi şekil katsayısı
E_0=	1.60	N/mm^2	Kauçuk malzemenin esneklik modülü
E_c=	1061	N/mm^2	Elastomer yalıtım biriminin basınç modülü
k=	0.60	-	Kauçuk malzemenin sertlik değeri
E_v=	701	N/mm^2	Düşey rijitlik modülü
k_v=	840167.6	kN/m	Elastomer yalıtım biriminin düşey rijitliği

Tablo 2'de hesaplamalarla bulunan değerlere ait denklemler aşağıdaki gibidir. [1]

$$A_r = B\,B' - (\pi B_L^2/4) \quad (1)$$

$$S = (B^2 - B_L^2)/(4\mathrm{Bt}) \quad (2)$$

$$E_c = E_0(1 + 2kS^2) \quad (3)$$

$$E_v = 1/(\tfrac{1}{E_c} + \tfrac{1}{K}) \quad (4)$$

$$k_v = \tfrac{E_v\,A_r}{T_r} \quad (5)$$

TBDY-2018 uyarınca Tablo 3'de hesaplanmış olan izolatör özellikleri belirlenerek yapı ve izolatör yer değiştirmeleri iterasyon yardımıyla eşitlenmiş ve nihai izolatör seçimi yapılmıştır. Bu özellikler CSI SAP2000 programına Tablo 4'deki gibi link eleman özelliği olarak tanıtılmıştır. Tablo 4'de görüldüğü üzere bir izolatör sistemi için alt sınır, nominal değer ve üst sınır olacak şekilde üç adet izolatör değeri bulunmaktadır. Hesapları yapılan izolatör özellikleri nominal değer olarak kabul edilmektedir. İzolatörlerin yaşlanma, çevresel etkiler, yükleme hızı, ısınma, imalattaki değişkenlikler nedeniyle olumlu ya da olumsuz etkilenme durumları göz önüne alınarak, alt değerler ve üst değerler TBDY-2018'deki ilgili çarpanlar sayesinde nominal değerden türetilerek sisteme işlenmiştir.

Yine TBDY-2018 uyarınca CSI SAP2000 programına DD1 depremi için 3 adet ve DD2 depremi için 3 adet izolatör olmak üzere 6 adet izolatör verisi tanımlanmıştır. Her bir izolatör tanımı için hesap adımları tekrarlanmış olup toplam 264 adet analiz yapılmıştır.

Tablo 3. Seçilen izolatörün hesaplanan özellikleri

$D_{(seçilen)}$=	0.147	m	Öngörülen deplasman
Adet=	45	-	Yalıtım birimi adedi
F_Q=	78.54	kN	Yalıtım biriminin karakteristik dayanımı
F_y=	87.27	kN	Etkin akma dayanımı
D_y=	0.0182	m	Yalıtım biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi
k_1=	4792.94	kN/m	Elastomer yalıtım biriminin başlangıç rijitliği (elastik rijitlik)
k_2=	479.29	kN/m	Elastomer yalıtım biriminin ikincil rijitliği (elastik ötesi rijitlik)
k_2/k_1=	0.100	-	İkincil rijitliğin başlangıç rijitliğine oranı
F=	140.08	kN	Yalıtım biriminde D yerdeğiştirmesine karşılık gelen dayanım
k_e=	955.52	kN/m	D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik
W_d=	40.33	kJ	Tüketilen enerji
β_e=	31.28	%	Etkin sönüm oranı
η_M=	0.535	-	En büyük deprem yer hareketi için sönüm ölçeklendirme katsayısı
T_M=	2.090	sn	En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu
$W_{(G+nQ)}$=	46693.23	kN	Binanın deprem sırasındaki toplam kütleye karşılık gelen ağırlığı
Q=	0	kN	Azaltılmış hareketli yük
Q/W=	0	-	Azaltılmış hareketli yükün toplam kütleye oranı
$\Sigma k_{eff,nom}$=	42999	kN/m	D yerdeğiştirmesine karşılık gelen toplam nominal etkin rijitlik
$T_{eff,nom}$=	2.090	s	D yerdeğiştirmesine karşılık gelen nominal etkin periyot
$S_{DS(DD-2)}$=	1.172	-	DD-2 deprem düzeyi için kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{D1(DD-2)}$=	0.406	-	DD-2 deprem düzeyi için 1 saniye periyot tasarım spektral ivme katsayısı
T_A=	0.069	s	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
T_B=	0.346	s	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
T_L=	6.00	s	Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu
ξ_{eff}=	30.0	%	DD-1 veya DD-2 deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım birimi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi (maksimum %30)
S_{ae}=	0.194	g	Yatay elastik tasarım spektral ivmesi
D_D=	0.147	m	En büyük deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirme
V/W=	0.135	-	Toplam kesme kuvvetinin toplam kütleye oranı
V_D=	4650.95	kN	Üst yapıya etkiyen kuvvet

Tablo 3'de hesaplamalarla bulunan değerlere ait denklemler aşağıdaki gibidir. [1]

$$F_Q = A_p \tau_{yp} \quad (6)$$

$$k_2 = G_v(A_r/T_r) \quad (7)$$

$$k_e = F/D \quad (8)$$

$$\beta_e = 1/2\pi(W_d/(FD)) \quad (9)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (10)$$

$$T_M = 2\pi\sqrt{W/(gK_M)} \quad (11)$$

$$D_M = 1.3(g/4\pi^2)T_M^2 \eta_M S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) \quad (12)$$

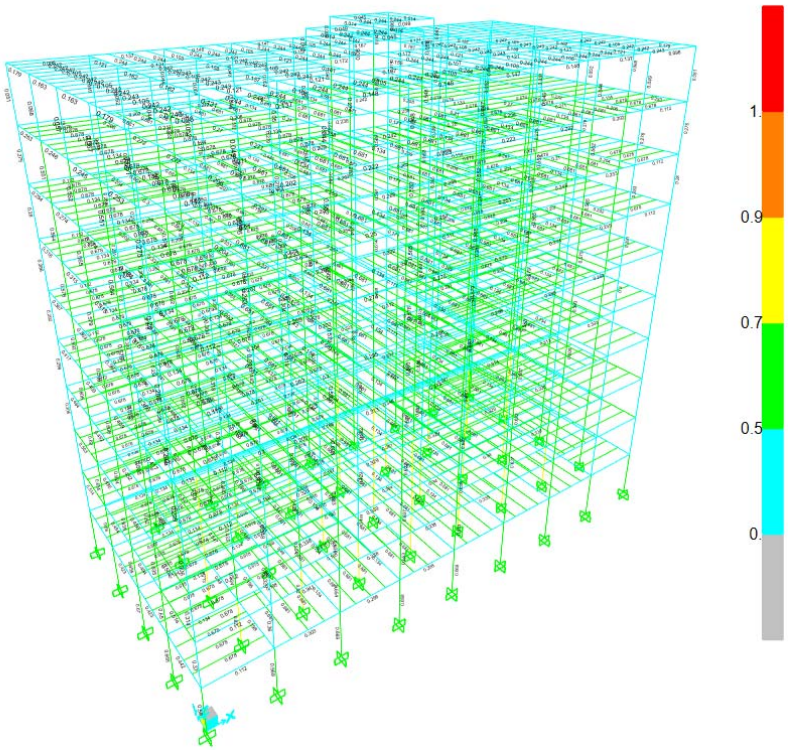
$$V_M = \frac{S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)\, W\, \eta_M}{R} \quad (13)$$

Tablo 4. Link eleman özellikleri için özet

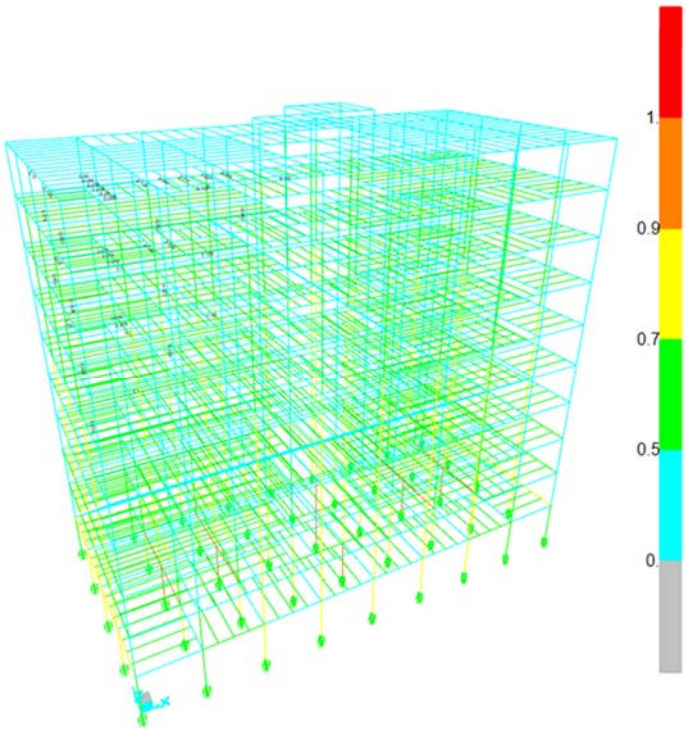
	DD-1			DD-2			
	Alt	Nom	Üst	Alt	Nom	Üst	
F_Q	46.73	78.54	126.22	46.73	78.54	126.22	kN
F_y	51.92	87.27	140.25	51.92	87.27	140.25	kN
D_y	0.0142	0.0182	0.0160	0.0142	0.0182	0.0160	m
k_1	3666.6	4792.9	8777.7	3666.6	4792.9	8777.7	kN/m
k_2	366.66	479.29	877.77	366.66	479.29	877.77	kN/m
k_2/k_1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-
F	241.53	248.70	327.09	119.59	140.08	201.54	kN
k_e	442.82	666.35	1336.07	561.81	955.52	1980.09	kN/m
W_d	99.31	111.53	115.54	37.14	40.33	43.32	kJ
ξ_{eff}	12.00	19.12	22.96	23.23	30.00	30.00	%
η_M	0.77	0.64	0.60	0.60	0.53	0.53	-
T_M	3.07	2.50	1.77	2.73	2.09	1.45	s
k_v	840168	840168	840168	840168	840168	840168	kN/m

III. SONUÇLAR

Yapılan analizler ve tasarımlar sonucunda her iki yapının da AISC 360-10 yönetmeliği ve burkulma boyu yöntemine göre pmm gerilme oranları geleneksel yapı için Şekil 13'de ve izolatörlü yapı için Şekil 14'de gösterilmiştir. Gerilmeler maksimumda tutulup yapının çelik metrajının düşürülmesi amaçlanmış olup karşılaştırma bu doğrultuda yapılmıştır.



Şekil 13. Geleneksel yapıya ait pmm oranları



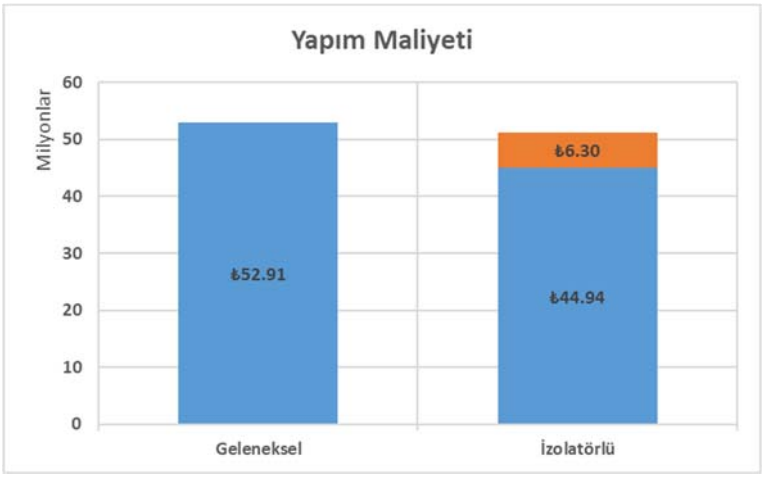
Şekil 14. İzolatörlü yapıya ait pmm oranları

Yapılan analizler ve tasarım sonucunda yapılara ait çelik metrajları yine CSI SAP2000 programından alınmıştır. Bulunan metrajlar ve maliyetler Tablo 5'de gösterilmiştir. Geleneksel yapı ve izolatörlü yapı maliyetinin karşılaştırılması ise Şekil 15'deki gibidir.

Tablo 5. Yapı metrajlarının karşılaştırılması

Geleneksel	Kolon	:	HEB500	258.62	ton
	Kiriş	:	HEB340	415.10	ton
	Tali Kiriş	:	IPE200	82.15	ton
			Toplam =	755.87	ton
			B. Fiyat =	70000	₺/ton
			Maliyet =	52.91	m₺

İzolatörlü	Kolon	:	HEB360	195.86	ton
	Kiriş	:	HEB300	364.05	ton
	Tali Kiriş	:	IPE200	82.15	ton
			Toplam =	642.06	ton
			B. Fiyat =	70000	₺/ton
			Maliyet =	44.94	m₺
LRB			Adet =	45	-
			B. Fiyat =	140000	₺/adet
			Maliyet =	6.30	m₺



Şekil 15. Yapım maliyetinin karşılaştırması

Araştırılan 10 katlı moment çerçeve çelik yapı bazında 45 adet LRB izolatörle kurulan sistem maliyeti, geleneksel yöntemlerle kurulan sistem maliyetinden %3.5 daha düşük bulunmuştur.

İzolatörlü yapı metrajı 1.25 ton/m^2 iken, geleneksel yapı metrajı 1.48 ton/m^2 olarak bulunmuştur.

İzolatörlü yapı birim maliyeti 100086 ₺/m^2 iken, geleneksel yapı birim maliyeti 103342 ₺/m^2 olarak bulunmuştur.

IV. TARTIŞMA

Yapılan bu çalışma içerisinde de incelenen 10 katlı moment çerçeve çelik yapı bazında izolatörlü yapının yapım maliyeti geleneksel yöntemlerle yapılan yapının yapım maliyetinden düşük çıkmıştır. Farklı deprem taşıyıcı sistemin, yapı kat adedinin, yapı geometrisinin, yapı kullanım amacının ve yapı lokasyonunun bu sonucu tamamen değiştirebileceği aşikardır. Her yapı kendi içinde ele alınıp analiz edilmelidir. Bu çalışmayla izolatörlü yapı maliyetinin geleneksel yapı maliyetinden düşük veya neredeyse aynı çıkabileceği gösterilmiştir.

V. ÇIKARIM

Deprem izolatörü bulunan çelik taşıyıcı sistemlerde maliyet önemli ölçüde artmadan ya da aynı kalarak yapının deprem güvenliğinin artırılabildiği gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında tariflenen izolatör sistemiyle, deprem etkileri sonucu ortaya çıkan ve can ve mal kayıplarından maliyet artışı olmaksızın kaçınılabilir.

KAYNAKLAR

[1] TBDY (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
[2] C. Alhan, M. Hacıermiroğlu – Uygulama Örnekleriyle Sismik İzolasyon, 2022.
[3] CSI Analysis Reference Manual, 2022.
[4] AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, 2010.
[5] Pasifik Deprem Araştırma Merkezi. PEER, https://ngawest2.berkeley.edu.
[6] Seismosoft SeismoMatch User Manual, 2024.
[7] Dynamic Isolation Systems, https://www.dis-inc.com/technical.html.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

SİNOP İLİ KOŞULLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİYLE TARIMSAL SULAMA VE AYDINLATMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ

Ebru DOĞAN[a], Mehmet Onur KARAAĞAÇ[b]*

[a]Sinop Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Sinop/Türkiye.
[b] Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Sinop /Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar: okaraagac@sinop.edu.tr**

ÖZET

Günümüzde nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve ekonomik büyüme kaynaklı elektrik enerjisi ihtiyacı hızla artmaktadır. Tarım ülkesi olan Türkiye'de pek çok denemeden sonra kırsal alanlarda, güneş panellerinin bitkiler ve çiftlik hayvanları için su pompalama gibi tarımsal uygulamalar için en iyi çözüm olduğunu görmüşlerdir. Bu çalışmada sulama sisteminde kullanılacak olan pompanın çalışması için gerekli elektrik ihtiyacı fotovoltaik paneller sağlanmıştır. Bu sisteme ek olarak yine aynı fotovoltaik panellerin ürettiği elektrik aydınlatma sistemi için de kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda gün boyunca üretilen toplam güçler karşılaştırıldığın da monokristal FV modül %15,9 daha fazla güç ürettiği bulunmuştur. Polikristal FV modül ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %4,77 ve %10,71 olarak hesaplanırken, monokristal FV modülün ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %5,63 ve %11,97 olarak hesaplanmıştır. Ortalama Monokristal modül verimi polikristale modüle oranla yüksek olduğu bulunmuştur. Sulamada kullanılan Sintine pompa anlık olarak 9 W güç tüketimi yaptığı düşünülürse tam bir dolu akü ile 9 saat çalışabileceği bulunmuştur. Bu da gece yapılabilecek sulama işlemini mümkün kılmaktadır. FV modüllerden üretilen elektrik gücünün ise güneş ışınımın yeterli olduğu saatlerde pompayı kesintisiz çalıştırabilecek kapasitede olduğu belirlenmiştir. Sistem hem birden fazla noktada aynı sulama döneminde hizmet verebilir hem de sulama sezonunun olmadığı dönemlerde kişisel enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: *Güneş Pili, Güneş Işınım, FV, Tarımsal Sulama*

DESIGN AND EXPERİMENTAL ANALYSIS OF SOLAR-POWERED AGRICULTURAL IRRIGATION AND LIGHTING SYSTEM UNDER SINOP CITY CONDITIONS

ABSTRACT

Today, electricity demand is rapidly increasing due to population growth, technological advancements, and economic growth. As an agricultural country, Turkey has found that solar panels are the best solution for agricultural applications such as water pumping for plants and farm animals in rural areas after many trials. In this study, photovoltaic panels were provided to supply the necessary electricity for the operation of the pump used in the irrigation system. Additionally, the electricity generated by the same photovoltaic panels was also used for the lighting system. The study revealed that when comparing the total power generated throughout the day, monocrystalline PV modules produced 15.9% more power. While the average and peak efficiencies of polycrystalline PV modules were calculated at 4.77% and 10.71%, respectively, the average and peak efficiencies of monocrystalline PV modules were calculated at 5.63% and 11.97%, respectively. It was found that the average efficiency of monocrystalline modules is higher compared to polycrystalline modules. Considering that the Sintine pump used in irrigation consumes 9 W of power instantly, it was determined that it could operate for 9 hours with a fully charged battery. This enables irrigation operations to be carried out at night. It was also determined that the electricity generated from PV modules is capable of continuously powering the pump during hours with sufficient sunlight. The system can serve multiple points simultaneously during the same irrigation season and can also be used to meet personal energy needs during non-irrigation periods.

Keywords: *Solar Cell, Solar Radiation, PV, Agricultural Irrigation*

I. GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan nüfus, endüstrileşme ve teknolojik gelişmeler, ihtiyaç duyulan enerji miktarını gün geçtikçe arttırmaktadır. Ülkeler enerji talebini karşılayabilmek için mevcut kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasının yanı sıra makro veya mikro boyutta enerji üretim çeşitliliğini teşvik etmeye çalışmaktadırlar. Küresel çapta bir yarışın başladığı bu dönemde, enerji tüketiminin sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilmesi için farklı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çözümler aranmaktadır. Bu bağlamda, enerji üretimindeki çeşitliliğin artırılması, çevre dostu teknolojilere yönelik yatırımların teşvik edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi hedefler, küresel düzeyde bir rekabet ortamının oluşmasına neden olmaktadır. Gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yapılan bu yarış, sadece enerji güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de gözeterek, dünya genelinde daha sağlıklı bir enerji geleceğinin inşasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Yenilenebilir enerjiye ek olarak, nükleer enerji, Türkiye'nin enerji güvenliğini sağlamak ve büyüyen enerji talebini karşılamak amacıyla değerlendirilen bir seçenektir. Akkuyu Nükleer Güç Santrali (4800 MW) projesi, Türkiye'nin nükleer enerji alanındaki ilk deneyimidir ve ülkede bu alandaki potansiyeli artırmak adına önemli bir adımdır. Türkiye'nin enerji stratejilerindeki bu dengeleme çabaları, sürdürülebilir bir enerji geleceği için umut verici bir temel oluşturmaktadır. Özellikle, Türkiye'nin coğrafi konumundan dolayı güneş enerjisi alanında potansiyelini arttırarak bu alanda bir ivme kazanmıştır.

Güneş enerjisi iki genel başlık altında ele alınabilir: Isı ve elektrik üretimidir. Bu çalışmada elektrik üretimi üzerine odaklanmıştır. Bu kapsamda, güneşten elektrik enerjisi üretebilmek için kullanılabilen en önemli yapılar fotovoltaik hücrelerdir. Bu hücreler, güneş ışığının fotokimyasal tepkimeler aracılığıyla elektriğe dönüştürülmesini sağlar. Güneş tarlaları gibi büyük ölçekli kullanımlarının yanı sıra evde bahçede kampta kullanımları gibi küçük ölçekli kullanımları da mevcuttur. Gün geçtikçe de kullanımları yaygınlaşmaktadır [1]. Teknolojiyle ilk tanışıldığı sıralarda fotovoltaik hücrelerin veriminin düşük olduğu ve yüksek maliyete sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Yapılan çalışmalar, teknolojinin gelişmesi ve hücrelerdeki iyileştirmeler ile maliyetleri hızla düşmüş ve verimleri de ciddi oranda artmıştır. Bu sayede bu hücrelere erişim artarken günümüzde popüler enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Ayrıca, güneş enerjisinin yaygın olarak kullanılan fosil yakıtların aksine çevreci bir enerji üretim çeşidi olarak bilinmesi ve kategorileşmesi de popülerliğinin artmasına neden olmuştur. Özellikle kırsal bölgelerde, yenilenebilir enerji sistemleri, yerel enerji taleplerini karşılama konusunda ekonomik ve çevresel avantajlar sunarak, fosil yakıtlarla rekabet edebilir bir alternatif sunabilmektedir. Belirtilen kapsamlarda literatürde çeşitli çalışmalar bulunabilir [2]. Güneş enerjisinin tarımsal alanda kullanımın araştırılması birçok makalede araştırma konusu olmuştur. Bunlardan başlıcaları burada ele alınmaya çalışılacaktır.

Polat ve ark. [3], Eskişehir iklim şartlarında özellikle tarımsal sulamanın yapıldığı zaman periyodunda; güneş ve rüzgâr enerji sitemlerinin enerji üretim performanslarının ve sulama enerji etkinliklerinin araştırmışlardır. Çalışmada sistemlerden elde edilen enerji kullanılarak sulama kuyularından çıkarılan su, bir yerde depolanmakta ve suya ihtiyaç duyulan anlarda kullanılmaktadır. Deneysel sistemde yaklaşık 1,3 MWh/MWe güneşten, 0,9 MWh/MWe ise rüzgar enerjisinden üretim gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar enerjisi kullanılması durumunda sistem kendini 12,5 yılda, PV sistemin kullanılması durumunda ise 7,1 yılda amorti edeceğini bulmuşlardır.

Diğer bir çalışmada ise Kuzucu bu çalışmasında [4], Edirne ilinde sulama yapılacak tarım arazilerinin şebeke elektriği yerine hava koşullarını göz önünde bulundurarak güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi ile sulanması incelenmiş ve fotovoltaik sistemlerin tarımsal sulamada kullanıldığında maliyetleri, geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Bunun sonucunda fotovoltaik sistem için kurulumu için gerekli olan panel gücü 150MW ve elde edilecek enerji yaklaşık 405 MWh olarak bulmuştur. Kurulacak sistemin ömrü 25 yıl olarak alınırsa Edirne ilinde tarımsal sulamanın devlet destek bedeli kullanılarak PV panel ile elde edilen elektrik enerjisi ile yapılmasının uygun olacağını aktarmıştır.

Abdelkerim ve ark [5], çilek gibi sık sulama gerektiren bitkilerin sulanmasında güneş enerjisi ile çalışabilen sulama sisteminin performansını değerlendirmişlerdir. Geliştirdikleri sistem tasarımında dört giriş sensörü bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi toprak nem sensörü iken diğer ikisi su seviye tespit sensörüdür. Toprak nem sensörü, toprağın nemini ölçerken, seviye tespit sensörleri tanktaki su seviyesini belirlemektedir. Çıkış tarafları ise iki adet selenoid valfi içermekte ve bu valfler sırasıyla iki nem sensörü tarafından kontrol edilmektedir. Yazarlar, güneş panel modülünü kullanılarak başarılı bir şekilde sık sulama gerektiren bitkilerin sulanmasının sağlanabileceğini raporlamışlardır.

Başka bir çalışma ise Öztürk ve Demirbaş [6], tarafından ele alınan bu çalışmada, tarımsal sulamada suyu kontrollü bir şekilde kullanacak aynı zamanda bitkinin ihtiyaç duyduğu su miktarını tespit ederek otomasyonlu sulama yapacak, ihtiyaç duyduğu elektriği yenilebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi ile karşılayacak bir sulama sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem domates ve biber bitkilerinin ekili olduğu tarımsal arazide deneysel çalışmaları yapılarak otomasyonsuz sulanan damla sulama sistemi ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre otomasyonlu sulanan sistemde su tüketim miktarında azalma olduğu ve bitki verimliliğine de olumlu yönde katkı yaptığı görülmüştür.

Başka bir çalışmada, Roblin [7], güneş enerjisi ile çalışan sulama sistemi teknolojisinin gelişmekte olan ülkelerde sulama için ideal bir çözüm olup olmayacağını araştırmıştır. Yaptığı çalışma sonucunda yazar yüksek sıcaklıklardan ve sınırlı su kaynaklarından muzdarip olan ülkelerde, güneş enerjisi ile çalışan damla sulama sisteminin etkili su yönetimine katkıda bulunabileceğini ifade etmiştir. Bu sistemler su, para ve enerji tasarrufu sağlamakta faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kumar ve ark [8], yeşil enerji yaklaşımına yönelik gelişmeler ve beklentiler üzerine kapsamlı bir inceleme yayınlamıştır. Burada güneş enerjisi ile çalışan sulama sistemlerinin çevre dostu, maliyet-etkili, elektrik ve su kullanımını en aza indirmeye yardımcı olan sistemler olarak tanımlamışlardır.

Gültekin [9], GES sistemleri için çeşitli yönetim düzeyleri ve çiftlik yönetimine olan etkileri üzerine tartışma konularını ele almıştır. GES sisteminin yönetimi ile geleneksel sistemlerin yönetimi arasındaki en önemli fark, stratejik konulardadır. Taktik ve operasyonel yönetim açısından da farklılıklar gözlemlenebilir. Bu farklılıklar bu çalışmada ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Kılınç [10], İzmir bölgesi için hem güneş hem de rüzgar enerjisi hibrit sistemi ile biber üreten bir seranın sulama sistemi tasarlanmıştır. Bu tür uygulamaların enerji fiyatlarındaki artış dikkate alındığında ekonomik yönden uygulanabilirliği araştırılmıştır. Rüzgar ve güneş enerji potansiyeli bulunan İzmir için bir çok sera uygulamalarının bulunması sistemin sadece biber için değil diğer ürünler içinde uygulanabilir olduğu ve bu tür sistemlerin ürün maliyetine de etkisinin olduğu düşünülerek yaygınlaşabilmesi için örnek bir çalışma olmuştur.

Diğer bir çalışmada Jandova ve Stranak [11], bir sıvı gübre deposu ve fazla sulamaya karşı bitkileri koruyan bir nem ölçer içeren özel bir güneş enerjili sulama sisteminin tasarımını ve üretimini raporlamışlardır. Bu sistemin, sadece kullanıcının ihtiyaçlarını değil, aynı zamanda bitkilerin ihtiyaçlarını da yansıtmakta olduğu ve güneş modülü kullanımı sayesinde çevre dostu bir sistem olduğunu belirtmişlerdir.

Mertens [12], güneş enerjili bir sulama sisteminin maliyet-fayda analizini, başlangıç sermaye maliyetini, bakım giderlerini ve enerji tasarruflarını içerecek şekilde bir çalışma yayınlamıştır. Önerilen güneş enerjili sulama sisteminin, sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etme, enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltma, çiftçilere ve kırsal toplumlara ekonomik avantajlar sağlama potansiyeline sahip olduğu çalışmada bulunmuştur.

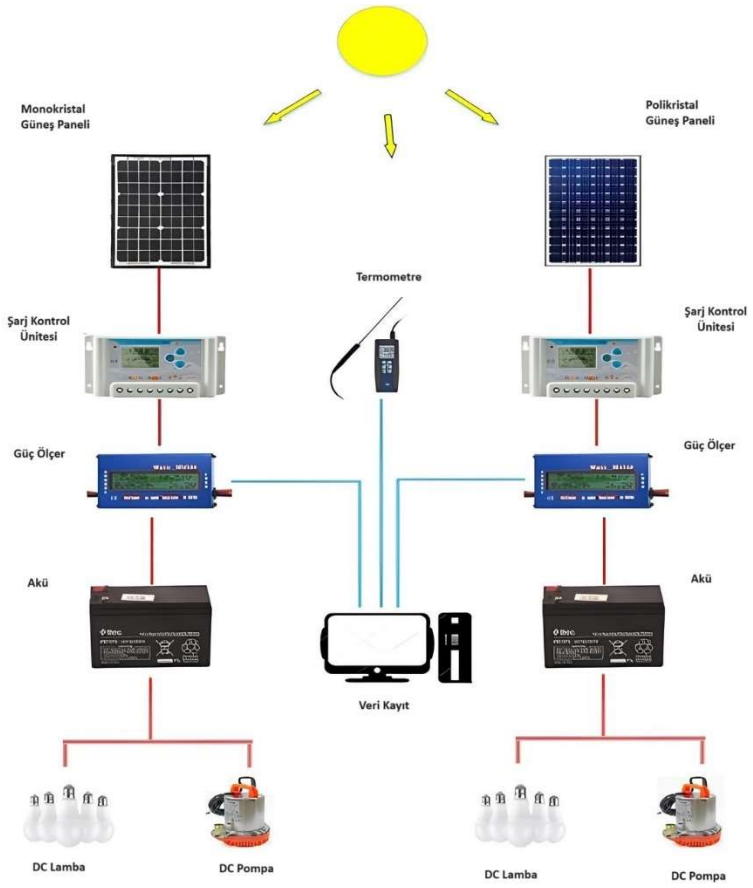
Biberci [13], Konya ilinde bir tarım alanının sulama için gereken elektrik enerjisi için bir şebeke bağlantılı güneş fotovoltaik sisteminin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, önerilen enerji sisteminin tarımsal sulama sistemleri için teknik ve ekonomik açıdan uygun olduğu bulunmuştur. Aynı zamanda, bu sonuçlar, sürdürülebilir ve maliyet etkili sulama sistemlerini tarımsal üretim için benimsemeyi hedefleyen çiftçiler ve politika yapıcılar için değerli olabileceği saptanmıştır.

Bu çalışmasında yukarıda birçok avantajı sıralanan güneş enerjisinin fotovoltaik hücreler kullanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu elektrik enerjisinin yararlı bir şekilde kırsal bölgede kullanılması amaçlanmıştır. Tarımsal üretimde enerjinin gerekliliği, teknolojik aletlerin kullanılması, gıda ve nüfus talebinin artması nedeniyle tarım sektöründe enerji ihtiyacı önemli derecede artmıştır. Bu ihtiyaç pompalar, motorlar, jeneratörler, vb. gibi tarım cihazlarına güç aktarımı talebi ile birlikte fosil yakıtlara ve konvansiyonel enerjiye olan bağımlılığı azaltacak alternatif bir enerji kaynağı gereklidir. Enerji kaynağının az ve olmadığı alanlarda, güneş enerji sistemi ile çalışan su pompaları önem arz etmektedirler. Bu çalışmada, Sinop ilinde tarımsal sulamada kullanılan 6 metrelik bir kuyu kullanılarak ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin şebeke yerine güneş enerjisinden karşılanması ve üretilen elektrik enerjisinin kuyu yanında aydınlatma içinde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu işlem gerçekleştirilirken monokristal ve

polikristal güneş panelleri iki ayrı sistem olarak kurulmuş ve bu sayede her iki panelin seçilen coğrafi konum için performans kıyaslaması da yapılmıştır. Kısaca, deney düzeneği güneş paneli, solar regülatör, wattmetre, piranometre, akü, aydınlatma ve su pompasından oluşmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Elektrik enerjisinin ulaşmadığı uzak tarımsal alanlarda sulama problemine karşı PV sistemler iyi bir çözümdür. Belirli bir güce kadar fotovoltaik sistemler, depolamalı olarak tasarlanabilir. Depolamalı sistemlerde amaç güneş enerjisi ile aküleri şarj ederek özellikle geceleri ve güneş ışınlarının yeterli derecede alınamadığı kapalı günlerde sulama sistemindeki pompa sisteminin çalıştırılmasını sağlamaktır. Bu proje kapsamında tasarlanan fotovoltaik sistem ile akü kullanılarak sistemin çalışması esas alınmıştır. Kuyu yanına yapılması planlanan kamelyanın aydınlatma ihtiyacı da burada aküye depolanan güneş enerjisinden karşılanmıştır. Yapılacak olan çalışma kapsamında iki farklı modül tipi karşılaştırılması yapılacak olduğundan bu sistemlerin birbiriyle aynı bileşenlere sahip şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistemde bir adet monokristal PV modül, bir adet polikristal PV modül, ikişer adet şarj kontrol ünitesi, güç ölçer, akü, DC lamba ve DC pompa bulunmaktadır. Sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri Tablo 1.'de sunulmuştur.



Şekil 1. Sistem şeması

Tablo 1. Kullanılan sistem ekipmanları ve özellikleri

Ekipman Adı	Özellikler
Şarj Kontrol Cihazı	MPPT Şarj Kontrol Cihazı, Şarj akımı: 20 A 2 USB Şarj portu: 5V 3A Boyut: 133x70x32mm
Monokristal PV Modül	Hücre Sayısı:36 Açık Devre Voltajı (Voc): 23,80V Maks. Voltaj (Vmp):20,7V Kısa Devre Akımı (Isc):2,54A Maks. Akım (Imp):2,50A MAks. Sistem Voltajı:1000V Standart Test Koşulları: Am=1.5 E=1000W/m2 Tc=25°C Absorber Yüzeyi (FV): Mono- kristal 675x425x30mm
Polikristal PV Modül	Hücre Tipi:Polikristal Hücre Sayısı:36 Panel Ağırlığı:3,80kg Açık Devre Voltajı (Voc): 22,10V Maks. Voltaj (Vmp):18,5V Kısa Devre Akımı (Isc):2,54A Maks. Akım (Imp):2,50A MAks. Sistem Voltajı:1000V Standart Test Koşulları: Am=1.5 E=1000W/m2 Tc=25°C Absorber Yüzeyi (FV): Poli- kristal 675x425x28mm
Şarj Kontrol Cihazı	S&P TD-250/100, 230–240 V, 50–60 Hz, 24 W
Pompa	Seaflo Sintine Pompası 500 GPH 12V-1,6 Amper
Akü	Voltaj: 12 Volt Amper: 7Ah Uzunluk: 150 mm Genişlik: 65 mm Yükseklik: 94 mm

Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik sistem güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılmıştır. Sistem değerleri nisan ayında alınmıştır. Monokristal ve polikristal PV modüller olmak üzere iki farklı modül tipi elde edilen elektrik ve verimlilik karşılaştırılmıştır. Bu modüllerden üretilen elektrik şarj kontrol üniteleri tarafından akülere yönlendirilir. Şarj kontrol üniteleri, akülerin aşırı şarjdan korunması ve enerji depolama sürecini optimize etmek için kullanılmıştır. Bu sayede, güneş enerjisiyle üretilen elektrik enerjisi akülerde depolanarak gün boyunca elde edilen enerjinin gece veya bulutlu günlerde kullanılmasını sağlanmıştır. PV Modüllerde üretilen enerji miktarını takip etmek için güç ölçer kullanılmıştır. Böylece sistemin verimliliği gözlemlenebilmiş ve enerji tüketimini optimize ve güç dağılımı izlenebilmiştir. Sistemde kullanılan aküler, depolama kapasiteleri pompanın gün içinde çalışma süresi dikkate alınarak seçilmiştir. Böylece tarım alanlarında ihtiyaç duyulan enerji sürekli olarak sağlanabilmektedir. Sistemde yer alan DC lamba ve pompa, enerji ihtiyacı olan alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Özellikle kuyu yanındaki kamelya, akülerde depolanan güneş enerjisi ile aydınlatılarak gece ve kapalı hava koşullarında kullanılabilir hale gelmiştir.

Bu çalışma, şebeke bağlantısı olmayan ve enerji maliyetleri yüksek olan bölgelerde tarımsal sulama için güneş enerjisi kullanımının avantajlarını vurgulamaktadır. Ayrıca, PV sistemlerinin depolamalı kullanımı ile gün içinde üretilen enerjinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi ve sürdürülebilir bir tarım uygulaması sağlanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, elektriğin olmadığı monokristal ve polikristal PV modüllerinin performanslarının karşılaştırılması, sistemin güneş enerjisini en verimli şekilde nasıl kullanabileceğini anlamamıza yardımcı olacaktır. Bu amaçla kurulan sistemin görselleri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Kamelyaya PV modül montajı



Şekil 3. Sistem görselleri

III. SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ

Fotovoltaik sistem güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme sürecinde termodinamik performansını önemli ölçüde etkileyen faktörlere tabidir. Bu bölümde, sistemin enerji dönüşüm verimliliği ve performansı üzerine yapılan analizlere odaklanılmıştır. PV sistemlerin performans parametrelerinden biri güneş ışığını elektriğe dönüştürme verimliliğidir. Monokristal ve polikristal PV modüllerinin her birinin verimlilik profili farklı ışık koşullarında nasıl performans gösterdiğini anlamak adına değerlendirilmiştir. Deney sisteminde kullanılan PV modüllerden elde edilen güç aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\dot{E}_l = V.I \tag{1}$$

Burada, V PV modülün gerilim değerini ve I ise FV modülün akımını ifade etmektedir. PV modülün verimlilik analizi, sistemden elde edilen gücün sistem gelen güneş ışığı gücüne oranlanmasıyla bulunabilir:

$$\eta_m = \frac{\dot{E}_I}{I(t)xA} \tag{2}$$

Burada, $I(t)$ ve A sırasıyla PV modülü gelen güneş ışığını ve PV modül alanını ifade etmektedir. Sistemde kullanılan DC lamba ve DC pompanın harcadığı güçleri bulma için aşağıdaki Denklem 3 ve 4 kullanılarak hesaplanabilir.

$$W_L = V_L.I_L \tag{3}$$

$$W_P = V_P.I_P \tag{4}$$

Denklem 3'te W_L lambada harcanan gücü, V_L lambanın gerilimini ve I_L lambanın akımını ifade ederken, Denklem 4'te W_P pompada harcanan gücü, V_P pompa gerilimini ve I_P pompa akımını ifade etmektedir.

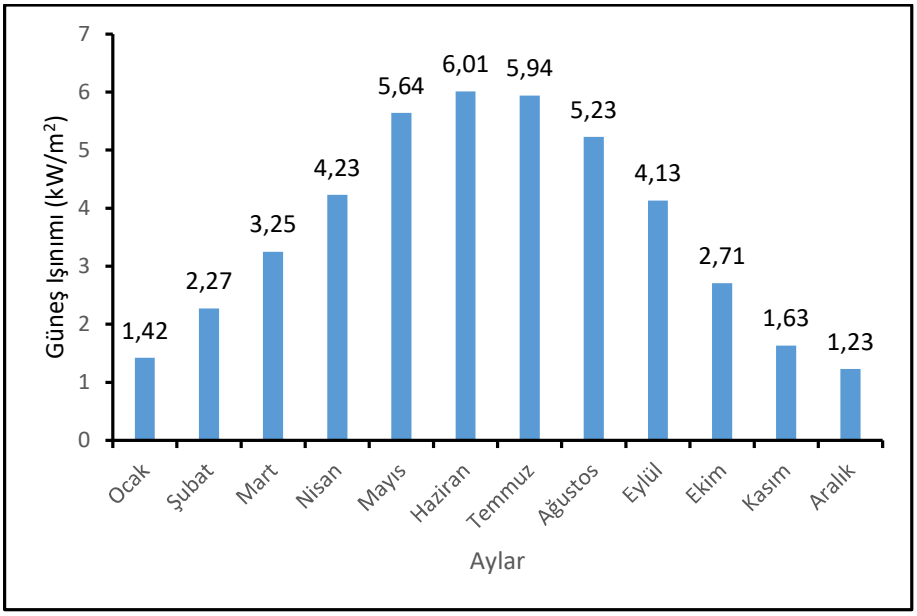
Sağlanan verilerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda okuma hataları, kullanılan cihazlar ve çevresel değişkenler gibi faktörlerden hata marjlarının belirlenmesi önemlidir. Belirsizlik düzeyini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan güvenirlik yöntemlerden biri de Kök-Toplam-Kare (RSM)'dir. PV modül verimi belirsizliği aşağıdaki matematiksel Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(t)}{I(t)}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{A}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5}$$

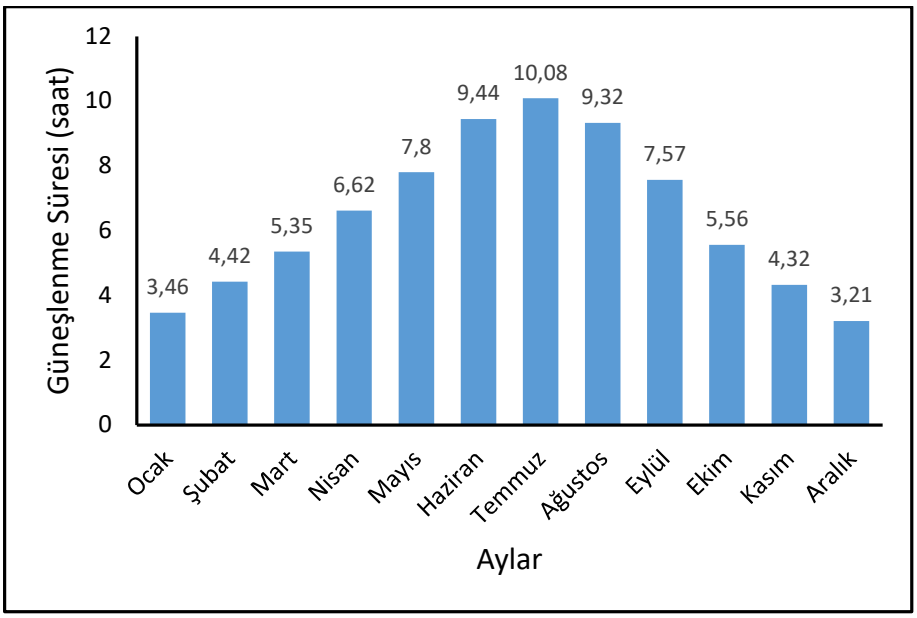
Buradan elde edilen toplam PV modül verim belirsizlik değeri %1 olarak bulunmuştur.

IV. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen deneysel sistem testi, Sinop ilindeki ilkbahar koşullarında nisan ayında yapılmıştır. Meteoroloji genel müdürlüğünden alınan Nisan ayına ait ortalama güneşlenme süresi Sinop'ta yaklaşık 5,3 saat, ortalama çevre sıcaklığı ise 10,6 °C'dir [14]. Türkiye güneş enerji atlası (GEPA) alınan Sinop ili ortalama değerlerine ait veriler Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir . Yatay yüzeye düşen Nisan ayı ortalama güneş ışınım miktarı ise 4.23 kWh/m²-gün ve güneşlenme süresi 6,62 saat olarak belirlenmiştir. Deney, sabah 08:00'de başlamış ve gün boyunca 18:00'e kadar devam etmiştir.

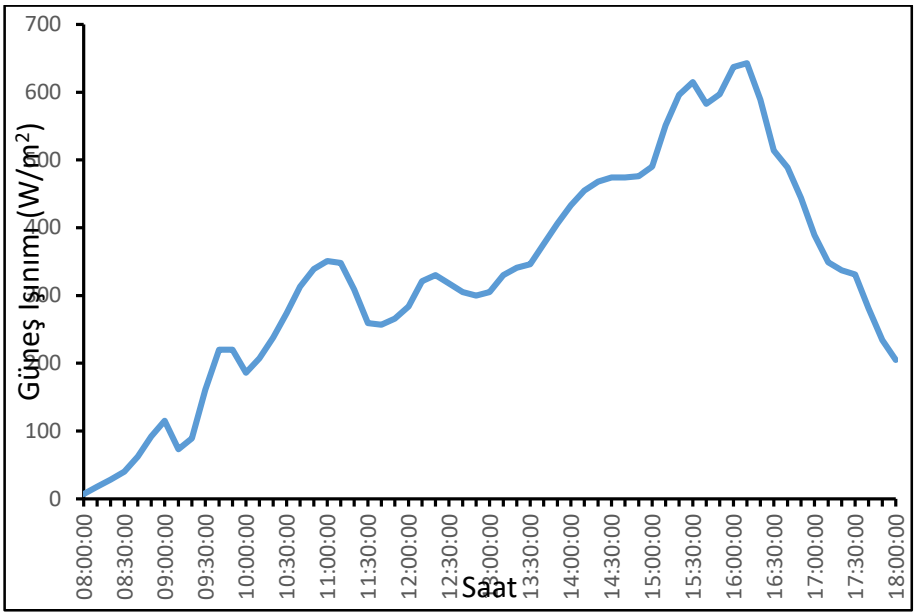


Şekil 4. Sinop iline gelen aylık ortalama güneş ışınım şiddetleri[16]



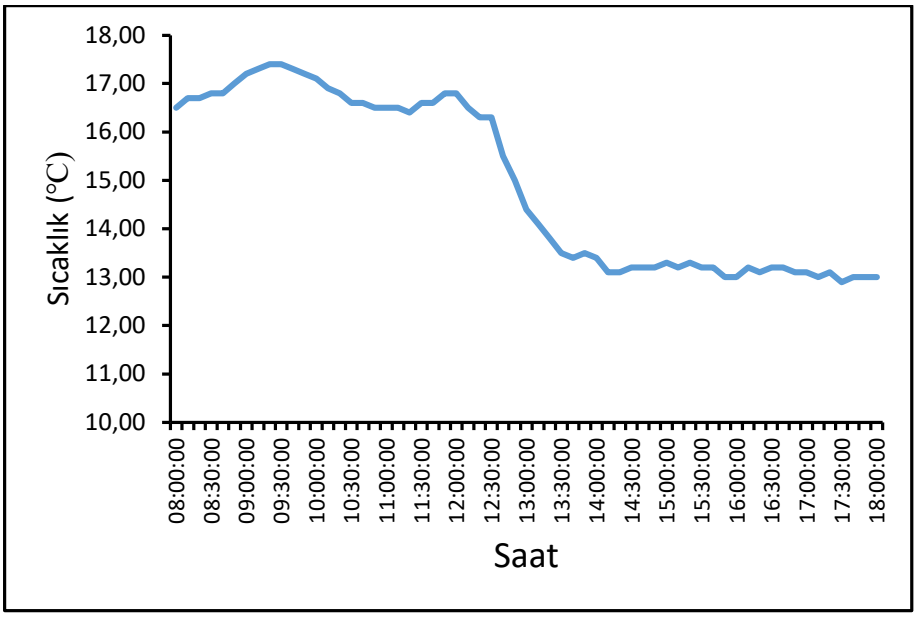
Şekil 5. Sinop ili aylık ortalama güneşlenme süreleri [16]

Deneyin yapıldığı günün güneş ışınım şiddeti Şekil 6'da gösterilmiştir. Deneyler boyunca güneş ışınım değerleri piranometre ile ölçülmüştür. Değişen güneş ışınımı şartları altında, PV modüllerin performansı ölçmek için deneyler saat 08:00'de başlayarak 8 W/m² seviyesinden başlayıp 643 W/m²'ye kadar ulaşmış ve saat 18:00 sona ermiştir. Ortalama olarak ise 330 W/m² seviyesinde gerçekleşmiştir.



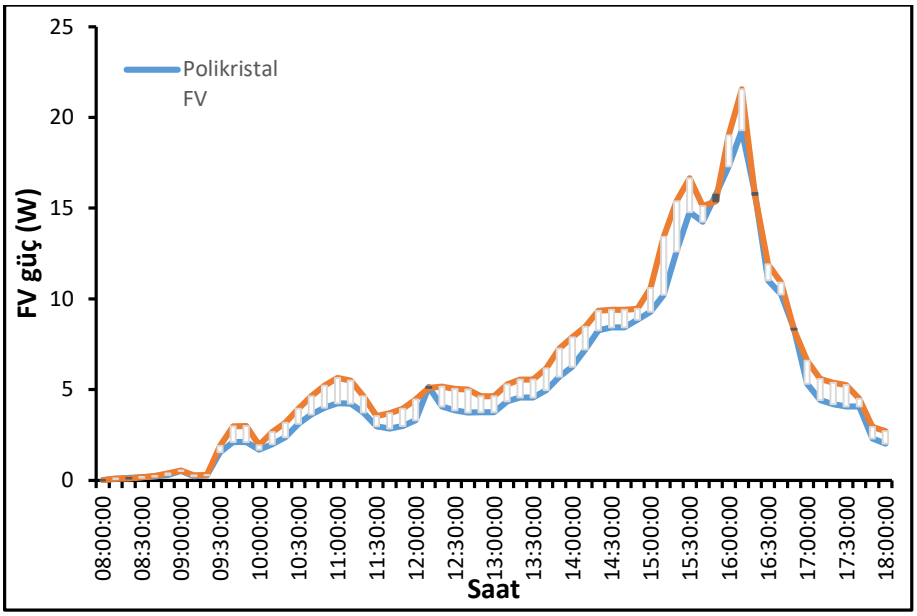
Şekil 6. PV modüllere gelen ışınım şiddetinin gün içindeki değişimi

Şekil 7'de deney boyunca çevre sıcaklığının değişimi gösterilmiştir. Çevre sıcaklığı saat 8:00 ve 18:00 arasında ortalama yaklaşık 15 °C olarak tespit edilmiştir. Gün boyunca en düşük çevre sıcaklığı 12,9 °C olarak gözlemlenirken, en yüksek çevre sıcaklığı 17,4 °C ulaştığı gözlemlenmiştir. Gün boyunca gözlemlenen sıcaklıklar PV modüller çalışması için uygun sıcaklıklardır.



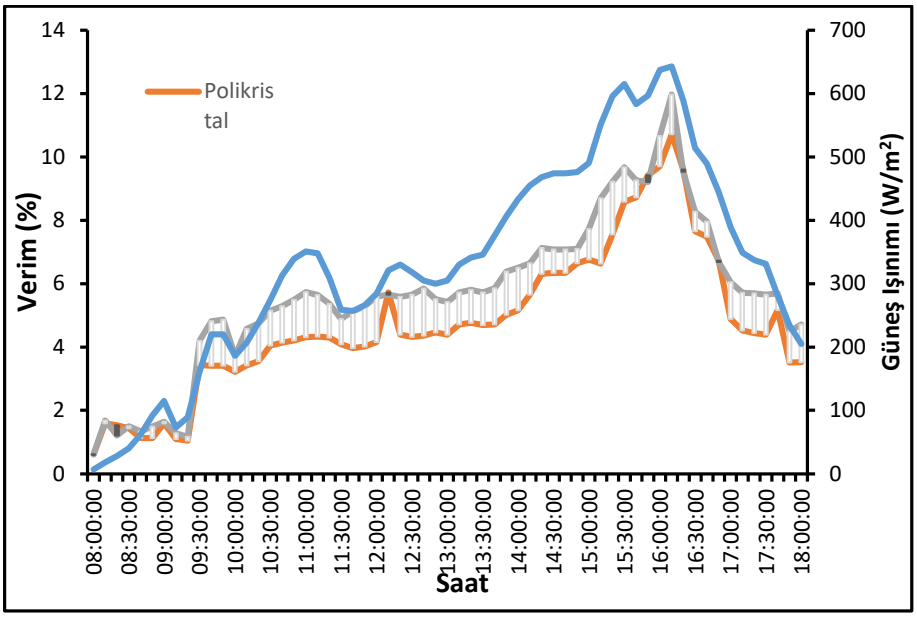
Şekil 7. Deney boyunca çevre sıcaklığının değişimi

Deney boyunca polikristal PV modülün ve monokristal PV modülün ürettikleri güçlerin değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Polikristal güneş modülü ortalama 5,45 W elektrik gücü üretirken, en yüksek 19,3 W güç ürettiği bulunmuştur. Monokristal güneş modülü ise ortalama 6,33 W elektrik gücü üretirken, anlık olarak en yüksek 21,56 W güç üretmiştir. Deneyin yapıldığı gün boyunca polikristal ve monokristal güneş modüllerinden elde edilen toplam güçler ise sırasıyla 333 W ve 386 W olarak hesaplanmıştır. Gün boyunca üretilen toplam güçler karşılaştırıldığın monokristal güneş modülü %15,9 daha fazla güç ürettiği bulunmuştur.



Şekil 8. Deney boyunca üretilen güçlerin değişimi

Şekil 9'da deney boyunca PV modüllere gelen güneş ışınımı ve modüllerin verimi gösterilmiştir. Güneş ışınımının düşük olduğu sabah saatlerinde PV modül verimleri oldukça düşükken, güneş ışınımının artmasıyla modül verimlerinde artış gözlenmiştir. Polikristal PV modül ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %4,77 ve %10,71 olarak hesaplanırken, monokristal PV modülün ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %5,63 ve %11,97 olarak hesaplanmıştır. Çevre sıcaklığının ortalama 15 °C ve güneş ışınımının ortalama 330 W/m² olduğu nisan ayında elde edilen verimler oldukça tatmin edicidir. Ayrıca bu şartlarda elde edilen verimler açısından da monokristal PV modülünün kullanılması uygun olunacağı bulunmuştur.



Şekil 9. Deney boyunca PV modüllere gelen güneş ışınımı ve modüllerin verimi

V. TARTIŞMA

Sinop ilindeki nisan ayında gerçekleştirilen deneysel sistem testiyle fotovoltaik hücreler kullanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu elektrik enerjisinin yararlı bir şekilde kırsal bölgede kullanılması için örnek uygulama yapılmıştır. Bu çalışmada, Sinop ilinde tarımsal sulamada kullanılan 6 metrelik bir kuyu kullanılarak ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin şebeke yerine güneş enerjisinden karşılanması ve üretilen elektrik enerjisinin kuyu yanında aydınlatma içinde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu işlem gerçekleştirilirken monokristal ve polikristal güneş panelleri iki ayrı sistem olarak kurulmuş ve bu sayede her iki panelin seçilen coğrafi konum için performans kıyaslaması da yapılmıştır. Deney boyunca elde edilen bilgiler ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- PV modüllerin performansı ölçmek için deneyler saat 08:00-18:00 arasında gerçekleştirilmiştir. PV modüllere gelen güneş ışınım şiddeti 8 W/m^2 seviyesinden başlayıp 643 W/m^2'ye kadar ulaşmıştır. Ortalama güneş ışınım şiddeti ise 330 W/m^2 seviyesinde gerçekleşmiştir.
- Çevre sıcaklığı ortalama yaklaşık 15 °C olarak tespit edilmiştir. Gün boyunca en düşük çevre sıcaklığı 12,9 °C olarak gözlemlenirken, en yüksek çevre sıcaklığı 17,4 °C ulaştığı gözlemlenmiştir.
- Deneyin yapıldığı gün boyunca polikristal ve monokristal güneş modüllerinden elde edilen toplam güçler ise sırasıyla 333 W ve 386 W olarak hesaplanmıştır. Gün boyunca üretilen toplam güçler karşılaştırıldığın monokristal güneş modülü %15,9 daha fazla güç ürettiği bulunmuştur.
- Polikristal PV modül ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %4,77 ve %10,71 olarak hesaplanırken, monokristal PV modülün ortalama ve en yüksek verimi sırasıyla %5,63 ve %11,97 olarak hesaplanmıştır.
- Sulamada kullanılan Sintine Pompa anlık olarak 9 W güç tüketimi yapıldığı düşünülürse tam bir dolu akü ile 9 saat çalışabileceği bulunmuştur. Bu da gece yapılabilecek sulama işlemini mümkün kılmaktadır.
- PV modüllerden üretilen elektrik gücünün ise güneş ışınımın yeterli olduğu saatlerde pompayı kesintisiz çalıştırabilecek kapasitede olduğu belirlenmiştir.
- Sürdürülebilir çevre açısından güneş enerjisi büyük önem taşımaktadır. Bu sistemden yararlanarak CO_2 emisyonunu en aza indirmiş oluyoruz.
- Sistem hem birden fazla noktada aynı sulama döneminde hizmet verebilir hem de sulama sezonunun olmadığı dönemlerde kişisel enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] S. Sayin, İ. Koç, GÜNEŞ ENERJİSİNDEN AKTİF OLARAK YARARLANMADA KULLANILAN FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER VE YAPILARDA KULLANIM BİÇİMLERİ, sujest 26 (2011) 89–106.

[2] E. Warman, F. Nasution, F. Fahmi, Energy cost unit of street and park lighting system with solar technology for a more friendly city, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 126 (2018) 012033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012033.

[3] M. Polat, T. Arabaci, A. Cengiz, TARIMSAL SULAMADA RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNİN KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI: ESKİŞEHİR ÖRNEĞİ, ESOGÜ Müh Mim Fak Derg 31 (2023) 905–916. https://doi.org/10.31796/ogummf.1251171.

[4] U. Kuzucu, İ. Becenen, Edirne ilinde tarımsal sulamada güneş enerjisi kullanımı, masterThesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. http://dspace.trakya.edu.tr/xmlui/handle/trakya/7762 (accessed January 29, 2024).

[5] A.I. Abdelkerim, M.M.R.S. Eusuf, M.J.E. Salami, A. Aibinu, M.A. Eusuf, Development of Solar Powered Irrigation System, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 53 (2013) 012005. https://doi.org/10.1088/1757-899X/53/1/012005.

[6] H. Demirbaş, Güneş enerjili otomatik bitki sulama sistemi, Master Thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. https://gcris.pau.edu.tr/handle/11499/35395 (accessed January 29, 2024).

[7] S. Roblin, Solar-powered irrigation: A solution to water management in agriculture?, Renewable Energy Focus 17 (2016) 205–206. https://doi.org/10.1016/j.ref.2016.08.013.

[8] D.B. Chidambaranathan, Solar powered water pumping systems for irrigation: A comprehensive review on developments and prospects towards a green energy approach, Materials Today: Proceedings (2020). https://www.academia.edu/88497225/Solar_powered_water_pumping_systems_for_irrigation_A_comprehensive_review_on_developments_and_prospects_towards_a_green_energy_approach (accessed January 29, 2024).
[9] S. Taşkaya, PROCEEDING BOOK EUROASIA SUMMIT 4th INTERNATIONAL APPLIED SCIENCES CONGRESS, 2021.
[10] C. Kilinç, Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Sera Sulama Sistemi Tasarımı: İzmir Örneği, Politeknik Dergisi 25 (2022) 435–442. https://doi.org/10.2339/politeknik.1085855.
[11] K. Jandova, R. Stranak, Design and optimization of solar-powered irrigation system, J. Phys.: Conf. Ser. 2382 (2022) 012012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2382/1/012012.
[12] Z. Mertens, Design and Analysis of a Novel Solar-Powered Irrigation System for Sustainable Agriculture, Indian Engineering Journal 1 (2023). https://indianengineeringjournal.com/index.php/journal/article/view/1 (accessed January 29, 2024).
[13] M.A. Biberci, Techno-economic analysis of a solar-powered agricultural irrigation system using PV*Sol software: A case study in Konya, Int. j. Agric. Environ. Food Sci. 7 (2023) 156–162. https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.1.19.
[14] Y. Alcan, M. Demir, S. Duman, Sinop İlinin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Ülkemiz Ve Almanya İle Karşılaştırarak İncelenmesi, ECJSE 5 (2018) 35–44. https://doi.org/10.31202/ecjse.340459.
[15] GEPA, (n.d.). http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx (accessed October 14, 2019).
[16] Türkiye Güneşlenme Süreleri Haritası – İllere Göre Güneş Paneli Hesabı › Munda Solar, (2020). https://mundasolar.com/2020/12/23/turkiye-guneslenme-sureleri-iller-aylik-yillik-ortalama/ (accessed January 29, 2024).

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Sıcak Haddeleme Prosesinde Hadde Giriş Sıcaklığının Enerji Tüketimine ve Yakıt Maliyetine Etkisi

Emrehan Gürsoy[a], Enes Kılınçarslan[b], Sena Kabave Kılınçarslan[c]*

[a]Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Karabük/Türkiye.
[b]Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Karabük/Türkiye.
[c]Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Karabük/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** emrehangursoy@gmail.com**

ÖZET

Bu çalışmada, 150x150 mm ölçüsünde 12 m uzunluğa sahip S235JR kalitesindeki bir kütüğün tav fırınına farklı giriş sıcaklıklarında işleme alınması durumunda ısıtma için gerekli olan enerji miktarının ve maliyetinin analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda fırında kullanılan yakıtın CNG olduğu ve fırın kontrol hacminin çevresi ile adyabatik sınır şartı oluşturduğu varsayılmıştır. Enerji ve yanma denklemleri yardımıyla yapılan hesaplamaların yanı sıra kütük üzerinde yığık sistem çözümlemesi de değerlendirilmiş olup, kütüğün altı farklı giriş sıcaklığını (T_i=300, 400, 500, 600, 700 ve 800°C) tavlama sonucu ulaşacağı sıcaklığa (T_s=1250°C) çıkarmak için gerekli olan enerji miktarının hem CNG hem de LNG yardımıyla elde edilmesi durumunda ortaya çıkan maliyetlerin analizi yapılmıştır. Ti sıcaklığını 300°C'den 400, 500, 600, 700 ve 800°C'ye çıkarılması durumunda enerji tüketiminde ve kullanılan CNG miktarında sırasıyla %10,53, %21,05, %31,58, %42,11 ve %52,63 oranlarında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç S235JR çeliğinin T_i sıcaklığını 100°C artırılması durumunda enerji miktarında ve CNG tüketiminde yaklaşık %10 azalma meydana geleceğini göstermektedir. Diğer yandan, CNG ve LNG'lerin piyasa değerleri baz alınarak yapılan maliyet hesaplamalarında kriyojenik sıcaklıklarda depolanan LNG'nin gazlaştırılması durumunda oluşacak maliyetin boru hatları ile doğrudan temin edilen CNG'nin maliyetine kıyasla %1143 oranında daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Tavlama, S235JR kalite çelik, CNG, LNG, Enerji ve yakıt maliyeti.*

Effect of Roll Enter Temperature on Energy Consumption and Fuel Cost in Hot Rolling Process

Emrehan Gürsoy[a], Enes Kılınçarslan[b], Sena Kabave Kılınçarslan[c]*

[a]Karabük University, Institute of Graduate Programs, Department of Energy System Engineering, Karabük/Türkiye.
[b]Karabük University, Institute of Graduate Programs, Department of Mechanical Engineering, Karabük/Türkiye.
[c]Karabük University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Karabük/Türkiye.
* **Corresponding Author:** emrehangursoy@gmail.com**

ABSTRACT

In this study, an analysis has been made of the amount and cost of energy required for heating a 150x150 mm, 12 m long, S235JR quality billet when processed at different annealing furnace inlet temperatures. In the calculations, it is assumed that the CNG used as a fuel in the furnace and that there is an adiabatic boundary condition for surrounding of the furnace control volume. In addition to the calculations made with the help of energy and combustion equations, the lumped system analysis on the billet has been also evaluated, and the necessary calculations have been made to increase the temperature of the billet from six different inlet temperatures (Ti=300, 400, 500, 600, 700 ve 800°C) to required annealing temperature (Ts=1250°C) on condition amount of energy obtained from both CNG and LNG. In case of increasing the Ti temperature from 300°C to 400, 500, 600, 700 and 800°C, the energy consumption and the amount of CNG used can be reduced by 10.53%, 21.05%, 31.58%, 42.11% and 52.63%, respectively. This result shows that there will be a decrease of approximately 10% in the amount of energy and CNG consumption on condition the Ti temperature of S235JR steel is increased by 100°C. On the other hand, in cost calculations based on

the market values of CNG and LNG, it has been concluded that the cost of gasification of LNG stored at cryogenic temperatures is 1143% less than the cost of CNG supplied directly through pipelines.

Keywords: *Annealing, S235JR quality steel, CNG, LNG, Energy and fuel cost.*

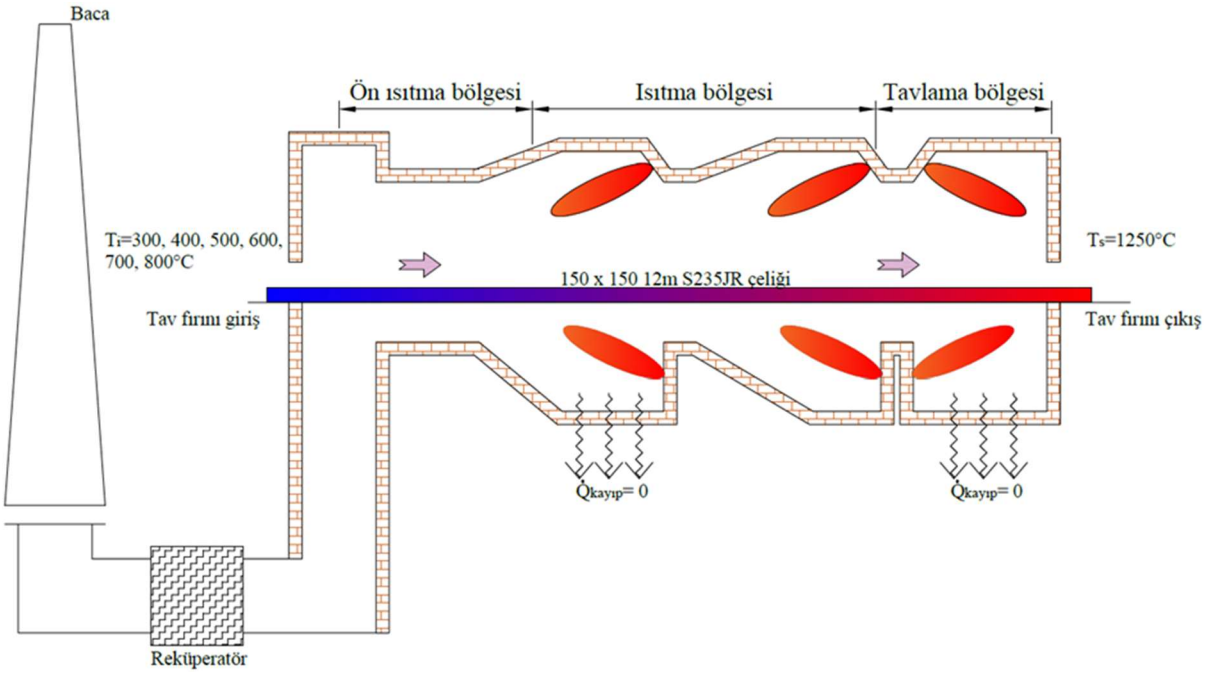
I. GİRİŞ

Son yıllarda küresel sıcaklıklarda yaşanan artışlar iklim krizlerinin meydana gelmesine neden olmuş ve birleşmiş milletler gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak için 120 ülkenin katılımı ile COP26 zirvesini gerçekleştirerek konu ile ilgili aksiyon planlarını ortaya koymuştur [1]. Bu planlardan en yüksek önceliğe sahip olan konu ise ülkelerin düşük karbon enerji sistemlerine olan dönüşümü hızlandırmasıdır [2] ve 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını sıfıra indirileceği konusunda taahhüt veren 14 ülke dahil toplam 50 ülke iklime dayanıklı, düşük karbonlu, sürdürülebilir sistemleri ortaya çıkarmayı taahhüt etmiştir [3].

Dünyadaki karbon emisyona neden olan sektörler incelendiğinde demir çelik sanayileri sera gazı yayma yoğunluğu yüksek olan sektörler arasında en yüksek paya sahip işletmelerdir. Demir çelik sanayileri dünyada üretilen enerjinin %7,0'ını kullanmakta ve bunun sonucunda yaklaşık olarak 7,0-9,0% oranında küresel sera gazı emisyonuna neden olduğu tahmin edilmektedir [4]. Demir çelik sanayindeki sera gazı emisyonlarını azaltmada kullanılan metotlarda ise enerji verimliliği ön plana çıkmakta olup üretimde alternatif materyallerin kullanımı ve sürdürülebilir üretim pratikleri bu amaca katkı sağlayan diğer faktörlerdir [5], [6]. Günümüzde üretim faaliyetlerini sürdüren çoğu demir çelik sanayilerindeki üretim süreçlerinde meydana gelen atık ısıdan faydalanma daha çevreci bir yaklaşıma sahip olma amacıyla yapılan uygulamaların başında gelmektedir [7]. Bu uygulamalardan biri de Sürekli Döküm Makinelerinde 900°C sıcaklıklarda elde edilen ingot, blum, slab ve kütüklerin sıcaklığını yeniden kristalleşme sıcaklığı olan yaklaşık 537°C'nin altına düşürmeden nihai ürünlerin üretildiği sıcak haddeleme işlemidir. Bu işlem demir çelik ve imalat sanayinde metallerin ray, levha, çubuk ve yapısal bileşenler gibi çeşitli formlarda şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sıcak haddeleme işlemi günümüzde bazı demir çelik sanayilerinin kuruluşunda göz önüne alınarak yatırım faaliyetleri yürütülmekte, bazılarında ise bu işlemin gerçekleşmesi için olması gereken donanımlar sonradan üretim süreçlerine dahil edilmektedir. Bu kapsamda sıcak haddeleme işlemi ve optimizasyonu ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmakta olup, He ve Wang [8] tarafından yapılan bir araştırma çalışmasında özetlenmiştir. Ayrıca Na vd. [9] bir demir çelik sanayisinin üretim sürecindeki enerji verimliliği, enerji tüketimi ve karbon emisyonları üzerine bir optimizasyon çalışması yürütmüştür. Yapılan çalışmanın ardından enerji verimliliğinin %4,20 oranında arttığı, enerji tüketiminin ve karbon emisyonunun sırasıyla 3,45 GJ/ton ve 399,9 kg/t-s azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar bu iyileştirmedeki payda önemli bir bölümünün sıcak haddeleme işlemi sayesinde gerçekleştiği ve bu işlemdeki düşüşün %51,21 olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada 150x150 mm ölçüsünde 12 m uzunluğa sahip S235JR kalitesindeki bir kütüğün farklı sıcaklık değerlerinde tav fırınına işleme alınması durumunda ısıtma için gerekli olan enerji miktarının ve maliyetinin analizi yapılmıştır. Çalışmada yakıt olarak sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) ve sıvılaştırılmış doğalgazdan (LNG) elde edilmiş CNG'nin kullanıldığı varsayılmış olup, sistemin tamamen adyabatik olduğu ve çevresi ile arasında herhangi bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır. Fırına ait temsili görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tav fırını görseli ve sınır şartlar

II. MATERYAL METOT

Yürütülen bu çalışmada, entegre demir çelik sanayilerinde Sürekli Döküm Makinalarında yaklaşık 900°C'de üretilen 150x150 ölçüsüne ve 12 m uzunluğa sahip S235JR kalitesindeki bir kütüğün nihai mamul üretiminden önce tekrar ısıl işleme maruz kaldığı tav fırınına girmeden önceki değişen sıcaklık değerine bağlı olarak kütüğün fırın içerisinde yaklaşık 1250°C sıcaklığa getirmek için gerekli olan enerji miktarı ve maliyeti üzerine analizler yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda yığık sistem çözümlemesi de dikkate alınmıştır. Ancak fırın içerisindeki ısı taşınım katsayısının kütüğe ait ısı iletim katsayısından çok daha yüksek olmasından dolayı Biot sayısı 5,08 olarak bulunmuştur. Bi≤0,1 olduğundan dolayı yığık sistem çözümlemesi yapılmamıştır.

Fırın içerisinde CNG'nin yanması sonucu ortaya çıkan ve kütük sıcaklığı 1250°C'ye ulaştırmak için gerekli enerji miktarını, CNG miktarını ve maliyetlerini hesaplamak için kullanılan CNG ve S235JR çeliğine ait fiziksel ve termofiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. CNG ve S235JR çeliğine ait fiziksel ve termofiziksel özellikler [10]–[13]

Özellik	**Değer**
S235JR özgül ısı değeri	470 J/kgK
150x150 birim kütle	180 kg/m
150x150 uzunluk (6-12 m)	12 m
CNG özgül ısı değeri	2340 J/kgK
CNG yoğunluk değeri	0,7 kg/Sm³
LNG yoğunluk değeri	450 kg/Sm³
CNG birim fiyatı	15,83 TL/Sm³
LNG birim fiyatı	8,91 TL/Sm³
CNG üst ısıl değeri	52225 MJ/kg
CNG alt ısıl değeri	47141 MJ/kg

150x150 mm ölçüsünde 12 m uzunluğa sahip S235JR çeliğin sıcaklığını belirli bir değere yükseltmek için gerekli olan ısı miktarı Eş. (1) ile hesaplanabilir.

$$Q = m_{kütük} \times c_{kütük} \times (T_s - T_i) \quad (1)$$

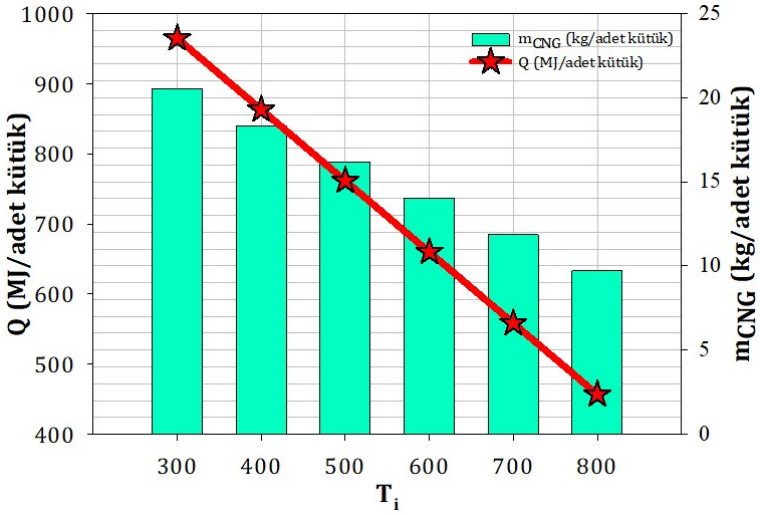
Bu eşitlikteki $m_{kütük}$ [kg] ve $c_{kütük}$ [J/kgK] sırasıyla S235JR çeliğinin kütlesini ve özgül ısı değerini gösterirken, T_i [°C] ve T_s [°C] sırasıyla kütüğün tav fırınına giriş ve çıkış sıcaklığını belirtmektedir. Bu eşitlikte T_s sıcaklık değeri sabit olup, T_i sıcak haddeleme işlemi için farklı sıcaklık değerlerini temsil etmektedir. Kütüğün tavlanması için gerekli olan ısı miktarı belirlendikten sonra bu enerjinin sağlanması için gerekli olan CNG miktarı Eş. (2) ile hesaplanabilir. Hesaplamalarda fırınının tamamen adyabatik bir sistem olduğu kabul edilmiş ve fırın içerisinde ışınım yoluyla meydana gelen ısı transferi ihmal edilmiştir.

$$m_{CNG} = \frac{Q}{H_{alt,CNG}} \tag{2}$$

Buradaki m_{CNG} ve $H_{alt,CNG}$ sırasıyla ısıtma gerekli olan CNG'nin kütlesini ve alt ısıl değerini göstermektedir. Bu noktada yapılan kabullerden biri de CNG'nin en kötü koşullarda yanması durumudur ve bu yüzden hesaplamalarda kullanılan değer alt ısıtma değeridir.

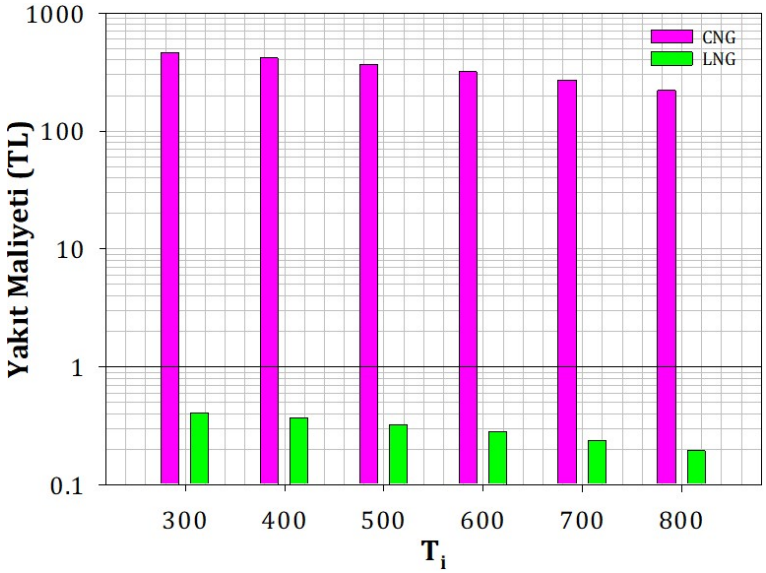
III. SONUÇLAR

Tav fırınına değişken T_i=300, 400, 500, 600, 700 ve 800°C sıcaklıklarında gelen S235JR çeliğini 1250°C sıcaklığa çıkarmak için gerekli enerji miktarı ve kullanılacak CNG yakıt miktarı Şekil 2'de verilmiştir. S235JR çeliğinin tav fırını giriş sıcaklığını T_i=300°C'den sırasıyla T_i=400, 500, 600, 700 ve 800°C'ye çıkarılması durumunda enerji tüketiminde ve kullanılan CNG miktarında yaklaşık olarak %10,53, %21,05, %31,58, %42,11 ve %52,63 oranlarında azalma meydana gelecektir. Sonuç olarak S235JR çeliğinin T_i sıcaklığını 100°C attırılması enerji miktarında ve CNG tüketiminde yaklaşık %10 azalma olacaktır.



Şekil 2. Farklı giriş sıcaklıklarında tavlanan S235JR çeliği için gerekli enerji ve yakıt miktarı

Yukarıda yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan CNG maliyeti ile ihtiyaç olan CNG'nin LNG'den elde edilmesi durumunda ortaya çıkan maliyetler Şekil 3'te verilmiştir. Sanayide kullanılan CNG'ler şehirlerdeki boru hatlarından temin edileceği gibi, tanklarda depolanabilen ve herhangi bir ilave faz değişim masrafı olmadan CNG'ye dönüştürülebilen LNG'ler de sistemlerde kullanılabilmektedir. CNG ve LNG için elde edilen TL/Sm^3 birim fiyatları Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketinden (BOTAŞ) alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tav fırınlarında CNG ve LNG kullanılması arasında %1143'e varan ciddi maliyet farklarının olduğu belirlenmiştir. İhtiyaç duyulan CNG'nin LNG'den elde edilmesi sanayicilerde karlılık attırıcı bir unsur olarak göz önüne çıkmaktadır.



Şekil 3. CNG ve LNG yakıt maliyetlerinin karşılaştırması

IV. TARTIŞMA

Enerji kullanımının ve maliyetlerinin giderek arttığı günümüz şartlarında enerjinin verimli kullanımı ve üretim maliyetinin düşürülmesi hususunda gerekli üretim hattı/ekipman revizyonları önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında haddeleme prosesinde başlıca üretim maliyetini oluşturan fırın yakıtının minimize edilmesi ve birim maliyeti daha ucuz olan yakıt türünün tercih edilmesi durumunda sağlanacak olan faydalar araştırılmıştır. Günümüz yakıt maliyetleri ve prosese uygun teknik incelemelerden yola çıkarak tav fırınına daha sıcak malzemenin şarj edilmesi durumunda yakıt kullanımında ve maliyetinde kayda değer iyileşmeler sağlanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre şarj sıcaklığının 100°C arttırılması durumunda kullanılan yakıt miktarı ve maliyetinde yaklaşık %10 azalma olacağı tespit edilmiştir. Ayrıca yoğunluğu ve buna bağlı miktarı dikkate alındığında tedarik maliyeti CNG'ye göre daha düşük olan LNG'nin yaklaşık %1143 oranında daha az maliyet oluşturacağı belirlenmiştir.

V. ÇIKARIM

Fırın şarj sıcaklığının arttırılması üretim maliyetini doğrudan ve önemli ölçüde etkileyen bir parametre olduğu birçok işletmeci ve araştırmacı tarafından bilinen bir olgudur ve bu çalışmada yapılan varsayımların akabinde değişken sıcaklıklara bağlı olarak yakıt kullanımında meydana gelen azalmaların analizi yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmanın, depolama ve gazlaştırma sistemi yatırım maliyeti dikkate alınarak tav fırınları için gerekli olan yakıtın LNG olarak sağlanması hususunda fayda maliyet analizlerinin yapılması sistem üzerinde çalışan tüm işletmecilere ve üretici firmalara önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] United Nations, "COP26: Together for our planet." https://www.un.org/en/climatechange/cop26
[2] Z. Wang, W. Xie, and C. Zhang, "Towards COP26 targets: Characteristics and influencing factors of spatial correlation network structure on U.S. carbon emission," Resour. Policy, vol. 81, p. 103285, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2022.103285.
[3] J. Wise, "COP26: Fifty countries commit to climate resilient and low carbon health systems," BMJ, vol. 375, 2021, doi: 10.1136/bmj.n2734.
[4] J. Kim et al., "Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options," Energy Res. Soc. Sci., vol. 89, p. 102565, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.ERSS.2022.102565.
[5] J. Chen, Y. Xing, Y. Wang, W. Zhang, Z. Guo, and W. Su, "Application of iron and steel slags in mitigating greenhouse gas emissions: A review," Sci. Total Environ., vol. 844, p. 157041, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.157041.
[6] L. Holappa, "A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry," Metals (Basel)., vol. 10, no. 9, 2020, doi: 10.3390/met10091117.
[7] R. Q. Wang, L. Jiang, Y. D. Wang, and A. P. Roskilly, "Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review," J. Clean. Prod., vol. 274, p. 122997, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122997.
[8] K. He and L. Wang, "A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 70, pp. 1022–1039, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.12.007.
[9] H. Na, J. Sun, Z. Qiu, Y. Yuan, and T. Du, "Optimization of energy efficiency, energy consumption and CO2 emission in typical iron and steel manufacturing process," Energy, vol. 257, p. 124822, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124822.
[10] Xometry, "Steel 1.0038 / S235JR." https://xometry.eu/wp-content/uploads/2021/02/Steel-1.0038.pdf
[11] Botaş, "2023 Yılı Ocak Ayı BOTAŞ Doğal Gaz Toptan Satış Fiyat Tarifesi." https://www.botas.gov.tr/
[12] engineeringtoolbox, "Gases - Densities." https://www.engineeringtoolbox.com/

[13] Illinois, "A, Section: Appendix Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels." https://courses.engr.illinois.edu/npre470/sp2018/web/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Rhamnolipid: Kıyısal Alanlardaki Mikroplastiklerin Biyoremidasyonu İçin Yeni Bir Yaklaşım

V. Zülal Sönmez[a], Ceyhun Akarsu[b], Nüket Sivri[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: zulalsonmez@duzce.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda, mikroplastikler insan ve çevre sağlığı için endişe kaynağı olarak ortaya çıkmıştır. Bu yüzden birçok araştırmacı mikroplastik kirliliğinin alıcı ortamlardan uzaklaştırılması üzerine odaklanmıştır. Rhamnolipidler ise, günümüzde farklı kirleticilerin biyoremediasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Rhamnolipidler, *Pseudomonas* sp. türleri tarafından doğal yollar ile hücre dışına salgılanmakta ve aynı zamanda ticari olarak da üretilebilmektedir. Toprak, deniz suyu ve tatlı su ortamları gibi farklı ekosistemlerde serbest yaşayan bir bakteri grubu olan *Pseudomonas*, özellikle İstanbul'un kıyı şeridi olan Marmara Denizi'nde sıklıkla rastlanılmaktadır. Bu çalışmada, kıyısal alandaki mikroplastiklerin biyoremidasyonu için Rhamnolipidin kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, mikroplastik kirliliğinin de yüksek olduğu bilinen Marmara Denizi kıyısal alanı yüzey suyunu temsilen sentetik deniz suyu hazırlanmıştır. Sentetik kıyısal alan yüzey suyuna rhamnolipid ile aglomerasyon işlemi uygulanmıştır. Mikroplastik olarak PVC (polivinil klorür) seçilmiş olup, Rhamnolipid optimum dozu tespiti için 1, 5, 10, 20, 40, 80 ve 100 mg/L konsantrasyonlar ile çalışılmıştır. Sonuçlar, görsel gözlem yoluyla ve çözeltinin üst fazındaki bulanıklığın ölçümü ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, optimum Rhamnolipid konsantrasyonu 1 mg/L olarak belirlenmiştir. Rhamnolipid aglomerasyon uygulaması sonrasında, PVC'ler çözeltinin üst kısmında floklar oluşturarak bir araya geldiği belirlenmiştir. Sentetik su ortamında yaklaşık %74 PVC giderim verimliliği elde edilmiştir. Bulgular, rhamnolipidin yüzey sularından mikroplastiklerin biyoremidasyonu için kullanılabilecek umut verici bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Aglomerasyon, kıyısal alan, Marmara Denizi, mikroplastikler, biyoremidasyon.*

Rhamnolipid: A New Approach For Microplastics Bioremediation in Coastal Areas

V. Zülal Sönmez[a], Ceyhun Akarsu[b], Nüket Sivri[b]*

[a] Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Düzce/Turkey.
[b]İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Istanbul/Turkey.
*Sorumlu Yazar: zulalsonmez@duzce.edu.tr

ABSTRACT

In recent years, microplastics have become a problem for human health and environmental. Consequently, numerous researchers have directed their efforts on reducing microplastic pollution in various ecosystems. Rhamnolipids, a class of surfactants, have attracted considerable attention due to their effectiveness in the bioremediation of various pollutants. These compounds are naturally secreted by *Pseudomonas sp*. and can also be produced commercially. *Pseudomonas*, a group of free-living bacteria found in various ecosystems such as soil, seawater, and freshwater, is common in the coastal region of the Marmara Sea, notably around Istanbul. The aim of this study is to evaluate the potential use of rhamnolipids for the bioremediation of microplastics in coastal areas. Synthetic seawater, simulating the surface water of the Sea of Marmara coast, renowned for its heavy microplastic pollution, was subjected to treatment. PVC (polyvinyl chloride) was chosen as the representative microplastic, with concentrations of 1, 5, 10, 20, 40, 80 and 100 mg/L, to determine the optimum rhamnolipid dosage. Evaluation of results was conducted through visual observation and measurement of turbidity in the upper phase of the solution. As a result, the optimum

rhamnolipid concentration was determined to be 1 mg/L. A PVC removal efficiency of approximately 74% was achieved. These findings suggest that rhamnolipids presents a promising approach for the bioremediation of microplastics from surface waters.

Keywords: Agglomeration, coastal water, Marmara Sea, microplastics, bioremediation.

I. INTRODUCTION

Plastics as vital organic-synthetic polymer materials offer advantages such as lightweight construction, wear resistance, chemical stability, high flexibility, and cost efficiency. They are used in various fields such as aviation, military, industry, agriculture, and daily life. However, the significant increase in plastic production has led to high levels of plastic pollution, which has a particular impact on aquatic ecosystems and affects biodiversity. Despite their inherently stable chemical structure and properties, large plastics can break down into smaller fragments when exposed to waves, weather conditions and ultraviolet light. Microplastics (MPs), defined in the scientific literature as plastic particles less than 5 mm in diameter, include primary MPs such as microbeads found in personal care and cosmetic products as well as resin particles used as industrial raw materials. Secondary MPs, which are created through physical, chemical, and biological processes from the decomposition of larger plastics, further contribute to the problem of plastic pollution [1]. And because this size of plastic is different from other types of waste, it can stay in the ocean, sea, river or soil forever. Plastics are resistant to degradation, which likely provides the opportunity for plastics to interact with other substances in the environment. The generation of plastic contaminants not only increases the spread of these pollutants but also likely provides a new environmental fate of pollutants in the environment. Recently, the generally accepted view is that plastics can act as "vehicles" for persistent organic pollutants (POPs), heavy metals, microorganisms, and other environmental pollutants in the environment [2-5]. On the other hand, considering that plastics can be transported from land to rivers and eventually reach the sea due to insufficient treatment, the threats they may pose to natural environments are increasing day by day. Furthermore, the limited effectiveness of wastewater treatment plants (WWTPs), which play a key role in protecting public health and the environment. Although WWTPs among these sources can remove up to 90% of MPs from wastewater, there are also many WWTPs where the efficiency of MP removal is below 50% [6-8]. In addition, it should also be considered that the wastewater enters the system in a continuous mixture in which the MP do not have enough time to be removed in the secondary and tertiary treatment due to the density difference [9].

Biosurfactants are bioactive compounds that are either produced or secreted on the surface of microbial cells, including bacteria, yeasts, and fungi, and serve to reduce surface tension [10]. Biosurfactants offer several advantages over their synthetic counterparts, such as low toxicity, high biodegradability, and the ability to remain effective even at high pH and salinity [11]. Among the biosurfactants that have attracted great industrial interest is rhamnolipid, which is commercially produced by microbial fermentation with *Pseudomonas* strains. To date, the names of more than 200 species of the genus *Pseudomonas* have been validly published, isolated from various environments such as plants, animals, soil, water, and air. About a dozen species of the genus *Pseudomonas* have been isolated from marine environments of marine animals, surface water, sediment, and seashore [12,13].

Rhamnolipids are widely recognized for their effectiveness in removing hydrophobic compounds, particularly in the remediation of contaminated soils. This effectiveness is due to their unique composition, which enables them to reduce the surface and interfacial tension between solid, liquid, and gaseous molecules. The hydrophobic nature of rhamnolipids suggests that they can adhere to the surfaces of MPs, facilitating the formation of heteroaggregates like exopolymer substances (EPS). Studies have shown that rhamnolipids can form aggregates of different sizes, with hydrodynamic radii ranging from tens to hundreds of nanometers' and influenced by factors such as concentration, pH, and temperature. In addition, taxonomic and metabolic pathway analyses have shown that *Pseudomonas* are more abundant on MPs than in the environment. It is noteworthy that rhamnolipids can also contribute to the coagulation of MPs in aquatic environments, leading to the formation of heteroaggregates. Building on the concept of surface wettability conversion, Jiang et al. used surfactants (collectors) such as anionic sodium oleate (NaOL) and cationic dodecyl trimethylammonium chloride (DTAC) to increase the hydrophobicity of various types of MPs (e.g. PVC, PP, PS, PET) and thereby improve flotation efficiency. Skaf et al. [14] examined the effect of several surfactants on particle stabilization of MPs when used with alum.

The Sea of Marmara is a semi-enclosed small basin that lies between the continents and boasts a unique location that connects the Mediterranean and the Black Sea through two straits, Çanakkale and İstanbul

[15,16]. As a result, it is exposed to various pressures from land and sea. These include urban and industrial effluents (such as chemicals, petrochemicals, textiles, tanneries, and metal extraction), shipping traffic, agricultural activities, and residential areas on land [15]. Numerous studies have focused on investigating the coasts of the Sea of Marmara [16-18]. These studies have shown variations in the abundance of particles. For example, Çullu et al [18] reported an average abundance of 33 particles per liter in the Küçükçekmece lagoon, while Sönmez et al [16] observed particle concentrations between 0 and 1000 particles per liter in the coastal region of Istanbul. To date, most research efforts have focused on investigating the presence and remediation of MP in urban water bodies, involving various sources such as storm water, drinking water, wastewater, waste sludge and surface water [19,20]. The aim of this study is to evaluate the potential use of rhamnolipids for the bioremediation of MPs in coastal areas. The ultimate goal is to aggregate MPs present in the aquatic environment with non-toxic substances and facilitate their effective removal from the environment.

II. Materials and Methods

A. Materials

In the research design designed following the purpose of the study, PVC was chosen as the base polymer. Polyvinyl chloride (PVC) is a widely used polymer made from vinyl chloride monomer units (57 wt.%). It is the third most demanded polymer in Europe and is often used in both rigid (e.g. sheets, pipes, window profiles) and flexible forms (e.g. packaging, containers, toys, medical and building materials). Typically, PVC products exposed to sunlight are treated with heat and UV stabilizers to increase their durability and stability. Plasticizers (e.g. phthalates, lead compounds, organotin compounds) are also added to increase flexibility. Plasticized PVC, also known as soft PVC, normally has a density of 1.1 to 1.35 g/cm^3. Notably, PVC-MPs are known to persist in the marine environment for long periods. In this study, specifically addresses Polyvinyl chloride (PVC) (<45µm, Merck), which has a high toxicity potential for aquatic organisms due to the presence of chlorine.

Synthetic seawater representing surface water from the coastal area of the Sea of Marmara, which is known to be heavily polluted with MPs, was prepared according to ASTM D1141-98. The solution was adjusted to a pH of 8.2 with 0.1 N sodium hydroxide (NaOH, Sigma-Aldrich). In the research design, Agglomeration with rhamnolipid was applied to the synthetic coastal surface water. For this purpose, rhamnolipid (Sigma Aldrich) was used for the experimental set-ups.

B. Reactor Setup

Pseudomonas, known for their ability to produce rhamnolipids, are frequently found in surface waters, especially in areas with high anthropogenic and industrial activities, similar to MPs. The behavior of PVC particles in the water column has been investigated (Figure 1). A concentration of 5.0 mg/L PVC was added into synthetic seawater. The agglomeration process with rhamnolipid was applied to the PVC-containing synthetic seawater, stirred at 40 rpm for 30.0 minutes and then sedimented for 120 minutes to promote floc growth. At the same time, blank samples were prepared with the same concentration of MPs but without rhamnolipid to study the effects of gravity-induced sedimentation. The supernatant was carefully extracted for quality assessment. Rhamnolipid concentrations from 1 to 100 mg/L were tested to determine the optimal rhamnolipid dosage. The results were determined by visual observation and measurement of turbidity in the upper phase of the solution.

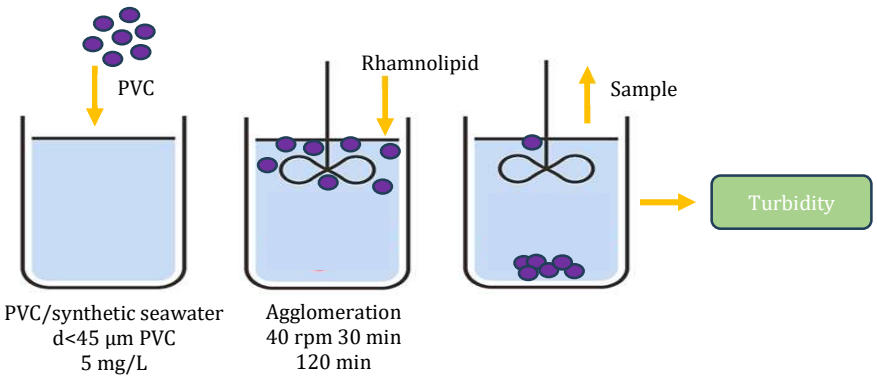


Figure 1: Schematic representation of experimental set

In this study, to evaluate the efficiency of PVC removal, turbidity measurements (Hach, 2100N) were performed in accordance with previous literature studies by extracting 10 ml of the upper phase, which tends to form flocs/aggregates on the surface of the mixture [14]. The estimated MPs removal was calculated by Eq. (1).

$$\text{Removal rate (\%)} = \left(\frac{To - Te}{To}\right) x\ 100\% \quad (1)$$

where T_0 and T_e are the turbidity at initial and agglomeration equilibrium stage, respectively.

C. Quality Control and Contamination Control

Throughout the process of sample preparation, processing, and analysis, it is important to be vigilant for potential contamination, which can come from a variety of sources, including atmospheric precipitation, the tools and equipment used, and even the clothing of laboratory personnel [21]. It is extremely important to minimize the risk of bias caused by these contaminants. Therefore, we have ensured that all our equipment was made of glass and was thoroughly rinsed with deionized water before use. In addition, laboratory staff wore cotton gowns for all laboratory procedures. To further minimize the risk of contamination from airborne plastics, we routinely covered our samples with aluminum foil [22].

III. RESULTS

The initial turbidity values of the synthetic seawater containing 5 mg/L of PVC particles less than 45 µm ranged from 2.20 NTU to 2.73 NTU, with an average turbidity value of 2.43 ± 0.18 NTU. The turbidity of the sample taken immediately above the aqueous solution was defined as the residual turbidity. Figure 2 shows the initial and residual turbidity in the solution according to the different applied concentrations of rhamnolipid. Consequently, the residual turbidity values in the solution varied from 0.61 NTU to 2.30 NTU. The residual turbidity value measured at the highest removal efficiency (73.4%) was 0.61 NTU. It is noteworthy that as the rhamnolipid concentration increased, the residual turbidity also showed a corresponding increase.

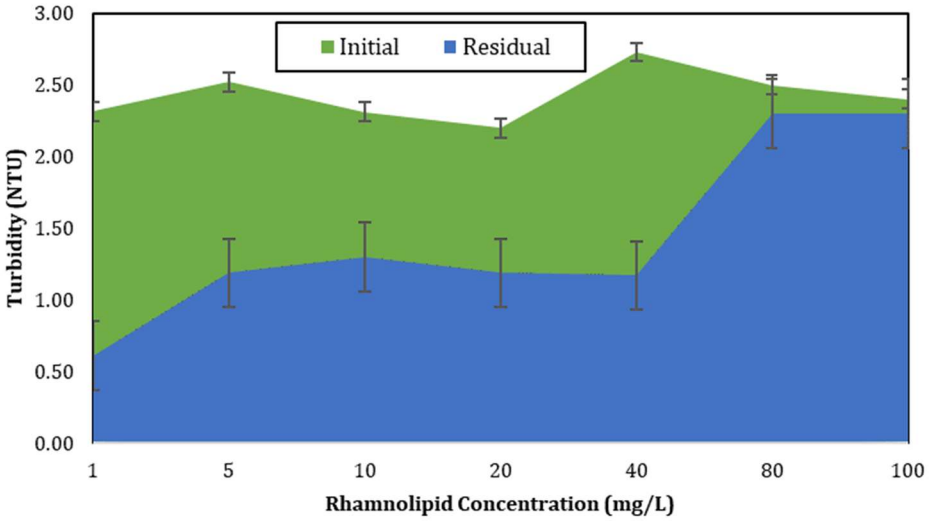


Figure 2: Initial and residual turbidity in the solution corresponding to different applied rhamnolipid concentrations.

Under stable pH (8.2) and salinity conditions (‰17) and with the application of rhamnolipid doses in the PVC-MPs/synthetic seawater mixture, the average PVC removal efficiency reached 74% (Figure 3). Interestingly, the presence of 1 mg/L rhamnolipid in the solution had a positive effect on PVC removal efficiency, but at higher doses it had a negative effect.

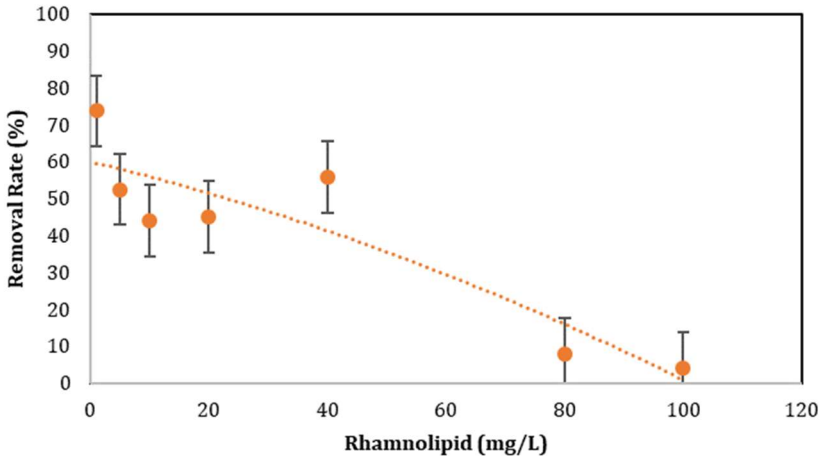


Figure 3. Determining the optimal rhamnolipid dose (d<45 µm PVC; PVC concentration: 5 mg/L)

Based on visual observations during the study, it was found that under optimal conditions the PVC-MPs aggregated on the surface of the experimental set-ups, with some of it settling to the bottom. In the presence of rhamnolipid, the PVC-MPs formed clusters, especially in the upper part of the solution. However, the PVC-MPs that had accumulated on the surface of the water due to the alum treatment tended to disperse. In contrast, the remaining PVC-MPs tended to be scattered on the surface in experimental set-ups where the conditions were not optimal.

IV. Discussion

There is a lack of literature on the remediation of MP, particularly in surface waters (seawater, etc.) [23,24]. Laboratory scale studies on the removal of MPs with different coagulants in synthetically produced surface waters are summarized in Table 1. In a study by Ariza-Tarazona et al [25], the initial efficiency of MP removal by coagulation with alum was 25.83%, but increased to 61.19% when 15 mg/L PAM was used as a flocculent. Corresponding to this research, Skaf et al [14] attempted to remove PE-MPs by using anionic and nonionic surfactants in addition to alum. They achieved an efficiency of 93.75% in the removal of MP from synthetic water containing 5 mg/L PE-MPs by using alum at concentrations of 5 to 10 mg/L [19].

Research shows that biosurfactants, in this case rhamnolipid, require lower concentrations compared to synthetic surfactants and are therefore more effective. Skaf et al [14] observed that the addition of 20 mg/L surfactant in combination with alum improved the coagulation performance of microspheres at low alum doses. However, it is important to note that a high particle load and too high alum dosage can negatively affect polymer removal. In our case, a decrease in MP removal efficiency was observed with increasing rhamnolipid dosage up to 20 mg/L.

Table 1: Lab-scale studies on the removal of MPs by several coagulants (Adapted from Girish et al. [26], Tang et al. [27])

MPs			Coagulant			Maximum Removal Efficiency (%)	Reference
Type	Size (µm)	Concentration (mg/L)	Name	Dose (mg/L)	Aid		
PE	15, 140	NA	$Al_2(SO_4)_3$	0.45–3.64	PAM	99	Lapointe et al. [19]
			ACH	0.91–3.64			
PE	3	$1.5x10^5$ MPs/L	PAC	5-50.0	NA	94	Wang et al. [28]
			$FeCl_3$				
			PFS				
			$Al_2(SO_4)_3$				
			$FeSO_4$				

PE	10-20, 45-53, 106-125	1800, 2000, 7000 MPs/L	$Al_2(SO_4)_3$	20	PolyDADMAC	20	Zhang et al. [29]
PS	0.18, 1.20	9500 MPs/L					
PS	10-90	$1.2x10^2$-$9.1x10^4$ MPs/L	$AlCl_3$	0-50	PAM	96	Na et al. [30]
			$FeCl_3$				
PA	4.8	$1.1x10^4$ MPs/L	PAC	3	NA	99	Nakazawa et al. [31]
PE	6.5						
PSI	4.8						
PS	100	10	$Al_2(SO_4)_3$	3.4	NA	99	Li et al. [32]

The consistent efficiency observed in the removal of PVC-MPs in synthetic seawater and freshwater suggests that rhamnolipid may be effective in different aquatic environments. In the marine environment, the production of rhamnolipid by *Pseudomonas sp.* is well documented, especially under extreme environmental conditions. This extracellular secretion, known for its adhesive properties, can have a profound effect on the organic and inorganic structures in its environment. Michels et al [33] have shown that biofilms promote the early aggregation of plastics with biogenic particles, resulting in stable aggregates that sink rapidly and accumulate in deeper parts of the sea. This process can also promote the vertical transport of organic material, such as algal blooms, into the sediment. The presence of heteroaggregates in the sediment facilitates deeper penetration of plastic-specific consortia, including potential pathogens. Furthermore, Schuhen et al [34] achieved aggregation of particles in water using organosilanes, regardless of the pH of the water environment. This process led to a significant enlargement of the particles (20-30 mm) and facilitated their removal from the environment.

V. Conclusion

As the demand for environmentally friendly and cost-effective production of biosurfactants increases, researchers are increasingly emphasizing methods that do not interfere with the natural mechanisms of aquatic ecosystems and do not harm biodiversity, especially in solution-phase applications. In this context, biosurfactants have gained importance due to their biodegradability and their focus on nature-friendly product ranges. The study showed an impressive removal efficiency for PVC-MPs in various aquatic matrices. By using these rhamnolipids in minimal concentrations, maximum removal efficiency was achieved. One of the most important findings of this study is the effective use of rhamnolipids as an alternative method to improve polymer removal. This opens the possibility of experimenting with different combinations of coagulants and rhamnolipids for different types of MPs, which is promising for the development of different scientific techniques. This research shows the potential for expansion from the laboratory to in-situ applications.

References

[1] V.Z. Sönmez, C. Akarsu, M. Cumbul Altay, N. Sivri. "Extraction, Enumeration, and Identification Methods for Monitoring Microplastics in the Aquatic Environment". In: Hashmi, M.Z. (eds) *Microplastic Pollution. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies*, Springer, Cham. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89220-3_2

[2] F. Wang, C. S. Wong, D. Chen, X. Lu, F. Wang, E.Y. Zeng. "Interaction of toxic chemicals with microplastics: a critical review", *Water research*, 139, 208-219, 2018.

[3] R.E. Engler. "The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean", *Environ Sci Technol*, 46:12302–12315, 2012.

[4] J.A.B. Neto, C. Gaylarde, I. Beech, A.C. Bastos, V. da Silva Quaresma, D.G. de Carvalho. "Microplastics and attached microorganisms in sediments of the Vitória bay estuarine system in SE Brazil", *Ocean & Coastal Management*, 169, 247-253, 2019.

[5] P. Li, X. Wang, M. Su, X. Zou, L. Duan, H. Zhang. "Characteristics of plastic pollution in the environment: a review", *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 107, 577-584, 2021.

[6] C. Akarsu, H. Kumbur, K. Gökdağ, A.E. Kıdeyş, A. Sanchez-Vidal. "Microplastics composition and load from three wastewater treatment plants discharging into Mersin Bay, North eastern Mediterranean Sea", *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110776, 2020. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110776.

[7] H.A. Leslie, S.H. Brandsma, M.J.M. van Velzen, A.D. Vethaak. "Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota", *Environ. Int.*, 101, 133–142, 2017. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.018.

[8] J. Talvitie, A. Mikola, O. Setälä, M. Heinonen, A. Koistinen. "How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant", *Water Res*., 109, 164–172, 2017. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.046
[9] C. Akarsu, H. Kumbur, A.E. Kideys. "Removal of microplastics from wastewater through electrocoagulation-electroflotation and membrane filtration processes", *Water Sci. Technol*., 84, 1648–1662, 2021. https://doi.org/10.2166/wst.2021.356
[10] S.T. Malkapuram, V. Sharma, S.P. Gumfekar, S. Sonawane, S. Sonawane, G. Boczkaj, M.M. Seepana. "A review on recent advances in the application of biosurfactants in wastewater treatment", *Sustain. Energy Technol. Assessments,* 48, 101576, 2021. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101576
[11] J.A.V. Costa, H. Treichel, L.O. Santos, V.G. Martins. "Solid-State Fermentation for the Production of Biosurfactants and Their Applications, in: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 357–372, 2018. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00016-5
[12] M. Wang, L. Sun. "*Pseudomonas oceani* sp. nov., isolated from deep seawater", *Int. J. Syst. Evol. Microbiol*., 66, 4250–4255, 2016. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001343
[13] N. Sivri, M. Jones, M. Allen. "Pseudomonas aeruginosa Isolated from Seawater the Marine Environments in the Istanbul Coastal Area (Turkey)", *Fresenius Environmental Bulletin (FEB)*, 23 (12b) 3340-3344, 2014.
[14] D.W. Skaf, V.L. , J.T. Punzi, K.A. Rolle Kleinberg. "Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation" *Chem. Eng. J*., 386, 123807, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123807
[15] I. Tan. "Preliminary Assessment of Microplastic Pollution Index: A Case Study in Marmara Sea", *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22(SI),TRJFAS20537, 2022. http://doi.org/10.4194/TRJFAS205
[16] V. Z. Sönmez, C. Akarsu, N. Sivri. "Impact of coastal wastewater treatment plants on microplastic pollution in surface seawater and ecological risk assessment", *Environmental Pollution*, 318, 120922, 2023.
[17] Ö. Gürbüz. "Sea of Marmara Microplastic Characterization And Distribution" (Master thesis, Istanbul University Institute of Marine Sciences and Management, 2017. (in Turkish).
[18] A.F. Çullu, V.Z. Sönmez, N. Sivri. "Microplastic contamination in surface waters of the Küçükçekmece Lagoon, Marmara Sea (Turkey): Sources and areal distribution", *Environmental Pollution*, 268, 115801, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115801
[19] M. Lapointe, J.M. Farner, L.M. Hernandez, N. Tufenkji. "Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation", *Environ. Sci. Technol*., 54, 8719–8727, 2020. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00712
[20] J. Xue, S. Peldszus, M.I. Van Dyke, P.M. Huck. "Removal of polystyrene microplastic spheres by alum-based coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) treatment of surface waters", *Chem. Eng. J.,* 422, 130023, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130023
[21] Y. Zhang, J. Zhao, Z. Liu, S. Tian, J. Lu, R. Mu, H. Yuan. "Coagulation removal of microplastics from wastewater by magnetic magnesium hydroxide and PAM", *J. Water Process Eng*., 43, 102250, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102250
[22] R. Egessa, A. Nankabirwa, H. Ocaya, W.G. Pabire. "Microplastic pollution in surface water of Lake Victoria", *Sci. Total Environ*., 741, 140201, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140201
[23] N. Wu, Y. Zhang, Z. Zhao, J. He, W. Li, J. Li, W. Xu, Y. Ma, Z. Niu. "Colonization characteristics of bacterial communities on microplastics compared with ambient environments (water and sediment) in Haihe Estuary", *Sci. Total Environ*., 708, 134876, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134876
[24] H. Jiang, , J. Bu, K. Bian, J. Su, Z. Wang, H. Sun, H. Wang, Y. Zhang, C. Wang. "Surface change of microplastics in aquatic environment and the removal by froth flotation assisted with cationic and anionic surfactants", *Water Res.,* 233, 119794, 2023. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119794
[25] M.C. Ariza-Tarazona, J.F. Villarreal-Chiu, V. Barbieri, C. Siligardi, E.I. Cedillo-González. "New strategy for microplastic degradation: Green photocatalysis using a protein-based porous N-TiO2 semiconductor", *Ceram. Int.*, 45, 9618–9624, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.208
[26] N. Girish, N. Parashar, S. Hait. "Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: Recent progresses and future perspectives", *Sci. Total Environ*., 899, 165723, 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165723
[27] W. Tang, H. Li, L. Fei, B. Wei, T. Zhou, H. Zhang. "The removal of microplastics from water by coagulation: A comprehensive review", *Sci. Total Environ*., 851, 158224, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158224
[28] X. S. Wang, H. Song, Y.L. Liu, X.R. Pan, H.C. Zhang, Z. Gao, D.Z. Kong, R. Wang, L. Wang, J. Ma. "Quantitively Analyzing the Variation of Micrometer-Sized Microplastic during Water Treatment with the Flow Cytometry-Fluorescent Beads Method", *ACS ES&T Eng.,* 1, 1668–1677, 2021. https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00253
[29] Y. Zhang, A. Diehl, A. Lewandowski, K. Gopalakrishnan, T. Baker. "Removal efficiency of micro- and nanoplastics (180 nm–125 μm) during drinking water treatment", *Sci. Total Environ*., 720, 137383, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137383
[30] S.H., Na, M.J. Kim, J.T. Kim, S. Jeong, S. Lee, J. Chung, E.J. Kim. "Microplastic removal in conventional drinking water treatment processes: Performance, mechanism, and potential risk", *Water Res*., 202, 117417, 2021. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117417
[31] Y. Nakazawa, T. Abe, Y. Matsui, K. Shinno, S. Kobayashi, N. Shirasaki, T. Matsushita. "Differences in removal rates of virgin/decayed microplastics, viruses, activated carbon, and kaolin/montmorillonite clay particles by coagulation, flocculation, sedimentation, and rapid sand filtration during water treatment", *Water Res.,* 203, 117550, 2021. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117550
[32] C. Li, R. Busquets, R.B. Moruzzi, L.C. Campos. "Preliminary study on low-density polystyrene microplastics bead removal from drinking water by coagulation-flocculation and sedimentation", *J. Water Process Eng*. 44, 102346, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102346
[33] J. Michels, A. Stippkugel, M. Lenz, K. Wirtz, A. Engel. "Rapid aggregation of biofilm-covered microplastics with marine biogenic particles", *Proc. R. Soc. B Biol. Sci*., 285, 20181203, 2018. https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1203
[34] K. Schuhen, M.T. Sturm, A.F. Herbort. "Technological approaches for the reduction of microplastic pollution in seawater desalination plants and for sea salt extraction", in: *Plastics in the Environment. IntechOpen*, 1–16, 2019.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Sabit Mıknatıslı Senkron Motor İçin Sensörsüz Vektör Kontrollü Sürücü Tasarımı ve Kontrolcü Parametrelerinin Motor Faz Akım Harmoniğine Etkisi

Hükmü Türk[a], Hasan Kelebek[a], Murat Kale[b]*

[a]İnform Elektronik San. Ve Tic. A.Ş. , İnform Elektronik ArGe Merkezi, Kocaeli/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

* **Sorumlu Yazar:** hukmu.turk@inform.com.tr

ÖZET

Sabit mıknatıslı senkron motorlar günümüzde endüstriyel, savunma sanayi, otomotiv, tüketici elektroniği vb. sektörlerde kritik bir rol oynayan yüksek verimliliği ve hassas kontrol edilebilmeleriyle bilinen motorlardır. Fırçasız bir yapıda olmaları bakım maliyetini, titreşim ve gürültü seviyesini düşürür ancak daha karmaşık bir kontrol yapısı gerektirir. Sabit mıknatıslı senkron motorların kontrolünde konum bilgisi için sensörlü ve sensörsüz konum algılama metotları mevcuttur. Sensörlerin maliyeti ve zamanla hassasiyetlerini kaybetmesi sebebiyle sensörsüz kontrol algoritmaları da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel amaçlar için kullanılan 310 Volt, 60 W ve 850 RPM nominal değerlerinde bir sabit mıknatıslı senkron motor için 165-265 Volt alternatif gerilimde çalışabilen alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemli sensörsüz bir sürücü tasarımı gerçekleştirilmiş ve benzetimi yapılmıştır. Motor kontrol edilirken farklı kontrolcü parametrelerinin motor faz akım harmoniğine etkisi incelenmiş, sürücünün akım, gerilim, sürme sinyalleri vb. elektriksel ölçümleri alınmış, termal ve dinamik davranışı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak motor kontrolcü parametre değişiminin motor faz akımı harmoniğine etkisi ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Vektör Kontrol, Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Sensörsüz Kontrol*

Design of Sensorless Vector-Controlled Driver for Permanent Magnet Synchronous Motor and the Effect of Controller Parameters on Motor Phase Current Harmonics

ABSTRACT

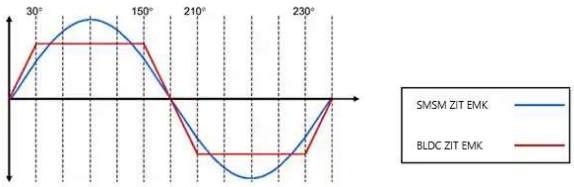
Permanent magnet synchronous motors are known for their high efficiency and precise controllability, playing a critical role in various sectors such as industrial, defense, automotive, consumer electronics, etc. Their brushless structure reduces maintenance costs, vibration, and noise levels, but requires a more complex control structure. There are both sensor-based and sensorless position detection methods for controlling permanent magnet synchronous motors. Due to the cost of sensors and their loss of accuracy over time, sensorless control algorithms are also utilized. In this study, a sensorless driver design based on field-oriented vector control method capable of operating at 165-265 volts AC for a permanent magnet synchronous motor with nominal values of 310 volts, 60 watts, and 850 RPM for industrial purposes has been implemented and simulated. The effect of different controller parameters on the motor phase current harmonics has been investigated during motor control. Electrical measurements such as current, voltage, switching signals, etc., have been taken, and thermal and dynamic behaviors have been observed. As a result, the influence of motor controller parameter variation on motor phase current harmonics has been demonstrated.

Keywords: *Vector Control, Permanent Magnet Synchronous Motor, Sensorless Control*

I. GİRİŞ

Yarı iletken ve mikroişlemci teknolojisinin gelişmesi ile elektronik olarak kontrol edilebilen fırçasız motorların kullanımı yaygınlaşmıştır. Fırçalı motorlara kıyasla fırçasız motorlar yüksek hız, yüksek verim ve yüksek ömür gibi avantajları nedeniyle endüstride hızla fırçalı motorların yerini almıştır.

Fırçasız motorları Zıt EMK şekline göre iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Zıt EMK dalga şekli trapezoidal formda olan motorlara Fırçasız DC Motor (BLDC) adı verilir. Zıt EMK dalga şekli sinüzoidal olan motorlara ise Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) adı verilir [1].



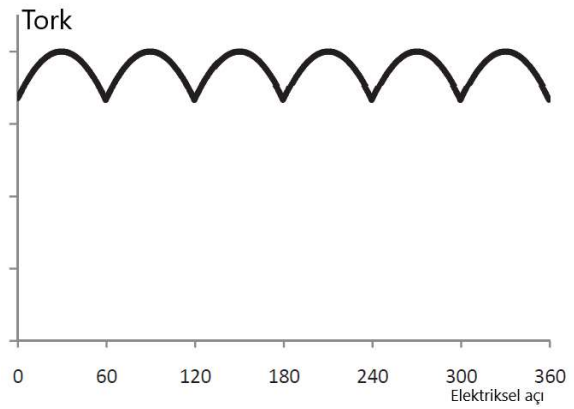
Şekil. 1 BLDC ve SMSM motorun Zıt EMK dalga şekilleri

Fırçasız motorlar sensörlü ve sensörsüz şekilde kontrol edilebilir. Sensör ile kontrolde rotor ve stator arasına sabit bir konumla yerleştirilmiş sensörler sayesinde motorun konum bilgisi öğrenilir ve motorun kontrolü sağlanır [2]. Sensörsüz kontrol yöntemlerinde ise motorun Zıt EMK veya motor akı yoğunluğu algılanması gibi metotlarla motorun konum bilgisi algılanır ve kontrol sağlanır [3]. Sensör ile kontrol metodunun dezavantajları olarak maliyeti, üretim zorluğu, motor üzerine montaj zorluğu ve harici kablo gereksinimleri sıralanabilir [4]. Bu gibi dezavantajlardan dolayı sensörsüz kontrol algoritmaları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Fırçasız motorların kontrolü için birçok algoritma mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan algoritmalar trapezoidal kontrol, sinüzoidal kontrol ve alan yönlendirmeli kontrol (FOC) şeklinde sıralanabilir [5].

Trapezoidal kontrolde, optimum tork üretimi için Fırçasız motorun rotorun konumuna göre aynı anda iki fazına trapezoidal kare dalga akımları uygular [6].

SMSM'ların trapezoidal kontrol yöntemi ile kontrol edildiğinde Zıt EMK dalga şeklinin sinüzoidal yapıda olması sebebiyle optimum akı etkileşimi daha düşük olur ve yüksek tork dalgalanmalarına sebep olur [7].



Şekil 2. Trapezoidal kontrol ile kontrol edilen SMSM'un tork karakteristiği.

Sinüzoidal kontrolde, rotorun konumuna göre tüm motor fazlarına 120° faz farklı sinüzoidal olarak değişen akımlar uygulayarak motorun kontrolü sağlanmış olur [8]. Trapezoidal kontrol ile karşılaştırılınca SMSM'lar için tork dalgalanmaları daha az olur. Sinüzoidal kontrol metodunda bazı dezavantajlar mevcuttur. Hız-akım döngüsü kontrolünde akımı kontrol eden geri besleme sisteminin kazanç (P-I) ve frekans tepkisi sınırlı olduğundan yüksek hızlarda motor akımlarında gecikmeler ve kazanç hataları oluşur [9].

Alan yönlendirmeli kontroldeki temel prensip ise motorun manyetik alanını belirli bir referans çerçevesine dönüştürerek kontrol etmektir. Bu dönüşümler genel olarak Clarke ve Park dönüşümleri olarak adlandırılır ve sabit referans çerçevesindeki stator akımını, döner bir referans çerçevesine çevirir (d, q) ve bu çevirimler kontrolü DC motor kontrol yapısına benzer bir yapıya dönüştürmüş olur [10]. Alan yönlendirmeli kontrolün diğer kontrol metotlarına göre avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir [11].

- Geniş bir hız aralığında maksimum tork kapasitesi sağlar.
- Daha iyi bir dinamik davranış sunar.
- Yüksek bir verim sağlar.
- Daha iyi bir Geçici ve sürekli durum performansı sağlar.
- Daha iyi bir tork ve manyetik akı kontrolü sağlar.

Literatür incelendiğinde Gabriel ve arkadaşları mikro işlemci kullanarak AC bir motoru alan yönlendirmeli kontrol algoritması ile kontrol etmişlerdir [12]. Rekioua ve arkadaşları BLDC ve SMSM motorlar için yeni bir alan yönlendirmeli kontrol yaklaşımı ortaya koymuşlardır [13]. C.H. De Angelo ve arkadaşları ne sinüse ne de trapeze benzemeyen bir şekil kullanarak, observer yapısı ile SMSM'un hız kontrolünü sensörsüz gerçekleştirmişlerdir [14]. Noboru Koshio ve arkadaşları sinüzoidal PWM tekniğini kullanarak SMSM'un pozisyon sensörsüz hız ve pozisyon kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [15].

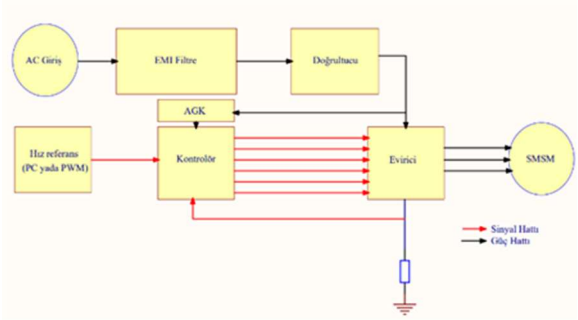
Bu çalışmada sensörsüz alan yönlendirmeli vektör kontrollü bir SMSM motor sürücüsü tasarlanmış, tasarlanan sürücünün donanım tasarımı ve simülasyonu yapılmış, elektriksel ölçümleri alınmış ve kontrolcü parametrelerinin akım harmoniğine etkisi gözlemlenmiştir.

II. MATERYAL METOT

A. Donanım ve PCB Tasarımı

Sürücünün elektronik donanımının ana kısımları şu şekildedir;

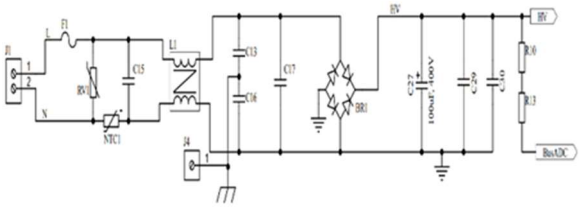
- EMI Filtre
- Doğrultucu
- Anahtarlamalı Güç kaynağı
- Evirici
- Kontrolör



Şekil. 3 Sistemin blok şeması

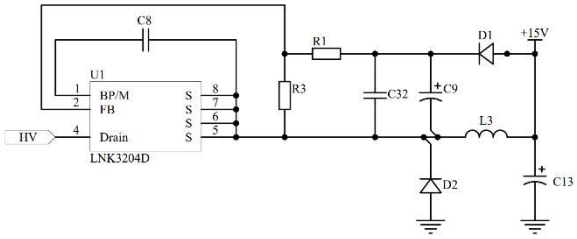
EMI filtre kısmı ortak ve fark mod gürültülerin elimine edilmesi için X, Y kapasitörleri ve ortak mod choke ile oluşturulmuştur. Ani gerilim yükselmelerinden korunmak için faz-nötr hattı arasına varistör, ilk enerjilendirmede ani akımların önlenmesi için faz hattına seri NTC kullanılmıştır. Sistemin aşırı akımlarda zarar görmemesi için faz hattına seri sigorta kullanılmıştır.

Doğrultucu kısmında AC gerilimi DC gerilime çevirmek için tam köprü diyot topolojisi, motor çalışır iken voltaj dalgalanmalarını azaltmak için DC bara kapasitesi olarak ise 100uF 400V değerinde bir alüminyum elektrolitik kapasite kullanılmıştır.



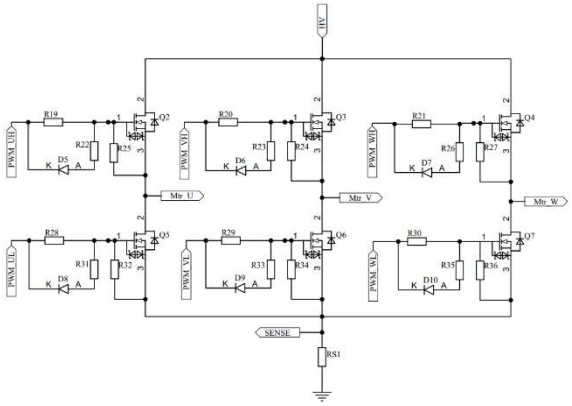
Şekil. 4 EMI filtre ve Doğrultucu kısmının devre şeması

Düşük gerilim sistemlerinin beslenmesi amacıyla 165-260 Vac giriş 15V DC çıkış sağlayan izolesiz düşüren dönüştürücü (buck) topolojisinde bir anahtarlamalı güç kaynağı tasarımı yapılmıştır.



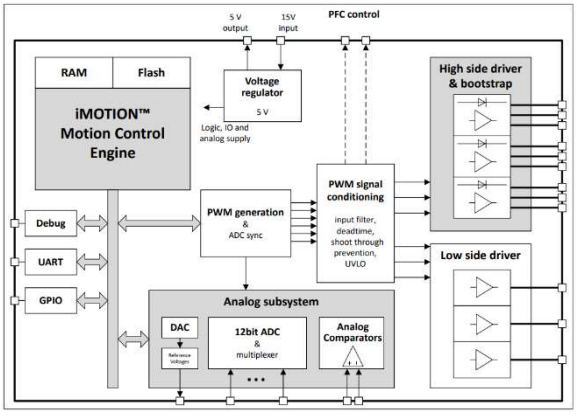
Şekil. 5 Anahtarlamalı Güç Kaynağı devre şeması

Motorun kontrolü için, mosfet kullanılarak 3 fazlı 2 seviyeli bir evirici topolojisi tasarlanmıştır. Motor faz akımları şönt direnci üzerinden ölçülerek kontrolör kısmına iletilmiştir.



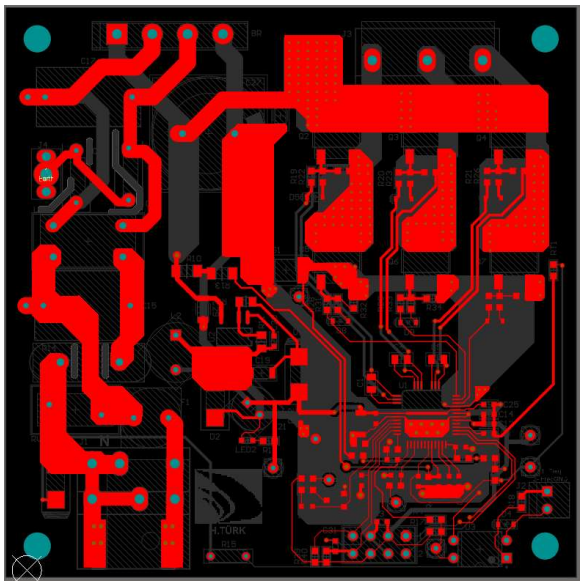
Şekil. 6 2 seviyeli evirici devre şeması

Sistemin kontrolü için İnfineon firmasının bir motor kontrol entegresi kullanılmıştır. Kullanılan kontrolör entegresinde şönt direnci üzerinden alınan motor akım bilgisinin yükseltilmesini sağlayan amplifikatörler, 2 seviyeli evirici topolojisinde kullanılan mosfetlerin sürülebilmesi için gerekli olan kapı sürücüleri ve 5V bir voltaj regülatörü dahili olarak mevcuttur.

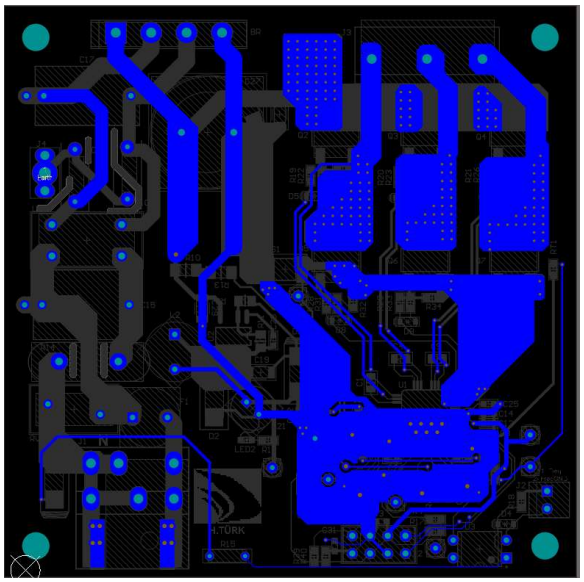


Şekil. 7 Kontrolör iç yapısı [16]

PCB tasarımı ise özellikle yüksek güçlü ve yüksek frekanslı devrelerde, doğru çalışma açısından çok önemli önemlidir. PCB tasarımında temel kural kontrol ve güç sinyallerinin birbirinden ayrılması, birbirlerinden etkilenmeyecek ve yolda bozulmayacak şekilde yolların ve referans alanlarının düzenlenmesidir. Şekil 8 ve Şekil 9 da PCB üst ve alt yolları gösterilmiştir. Tablo 1 de sürücünün teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil. 8 PCB üst kısım yolları



Şekil. 9 PCB alt kısım yolları

Tablo 1. Sürücü teknik özellikleri

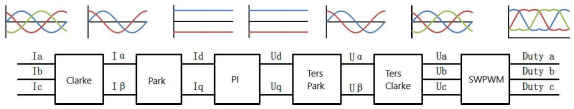
Parametre	Değer
Güç Katı Giriş Voltajı	165-265 Vac
Maksimum DC Bara Voltajı	400 V
Maksimum Güç	150 W
Anahtarlama Frekansı	16 Khz
Dijital Girişler	2 Adet (Optik izole)
Geri Besleme	Şönt direnci üzerinden geri besleme
Haberleşme Arayüzü	1 adet RS485

B. Alan Yönlendirmeli Kontrol

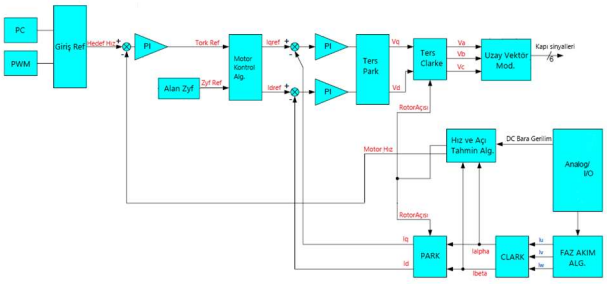
Alan Yönlendirmeli Kontrol, bir vektör tarafından temsil edilen stator akımlarının kontrol edilmesinden oluşur. Bu kontrol, 3 fazlı zaman ve hıza bağlı bir sistemi 2 koordinatlı (d ve q koordinatları) zamanla değişmeyen bir sisteme dönüştüren projeksiyonlara dayanmaktadır. Bu projeksiyonlar DC motor kontrolüne benzer bir yapıya yol açar. Alan yönlendirmeli kontrolde giriş referansı olarak tork (q

koordinatı) ve akı (d koordinatı) bileşenlerini kullanır ve bu sayede tork ve akı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Alan Yönlendirmeli Kontrol basitçe projeksiyonlara dayandığından, kontrol yapısı anlık elektriksel büyüklükleri ele alır ve bu sayede kontrol kararlı durum veya geçici durum koşullarında dahi doğru ve sınırlı bant genişliği matematiksel modelinden bağımsız hale getirir.

Alan Yönlendirmeli Kontrolde temel adımlar şu şekildedir; motor faz akımları DC bara gerilimi rotor pozisyon ve hızı ölçülür. Ölçülen büyüklükler Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak α-β referans düzleminden d-q referans düzlemine indirilir ve d-q referans düzleminde stator tork ve akı akım bileşenleri kontrol edilir. Daha sonrasında elde edilen bileşenler ters Clarke ve ters park dönüşümleri kullanılarak α-β referans düzlemine dönüştürülür ve uzay vektör modülasyonu ile stator üç faz gerilimi üretilir ve eviriciye uygulanarak motor kontrolü sağlanır.[17]



Şekil. 10 Alan yönlendirmeli kontrolün algoritma şeması [18]



Şekil. 11 Tasarlanan kontrol sisteminin şeması

Clarke, Park, Ters Clarke ve Ters Park dönüşümleri için matematiksel ifadeler sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

C. Sabit mıknatıslı Senkron Motor Parametreleri ve Kontrolcü Parametrelerinin Eşitlikleri

Sabit Mıknatıslı Senkron Motor stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan oluşur. Rotor üzerindeki kalıcı mıknatıslar sayesinde sabit bir manyetik alan oluşur. Stator sargılarının enerjilendirilmesi ile de zaman ve konuma göre değişen bir manyetik alan oluşturulur.

SMSM'un d-q düzlemine göre matematiksel ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$v_{\mathrm{qs}} = r_{\mathrm{s}} i_{\mathrm{qs}} + \frac{d\lambda_{\mathrm{qs}}}{dt} + \omega_r \lambda_{\mathrm{ds}} \quad (5)$$

$$v_{\mathrm{ds}} = r_{\mathrm{s}} i_{\mathrm{ds}} + \frac{d\lambda_{\mathrm{ds}}}{dt} + \omega_r \lambda_{\mathrm{qs}} \quad (6)$$

$$\lambda_{\mathrm{qs}} = L_{\mathrm{qs}} i_{\mathrm{qs}} \quad (7)$$

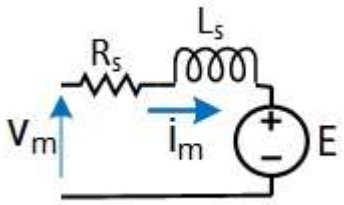
$$\lambda_{\mathrm{ds}} = L_{\mathrm{ds}} i_{\mathrm{ds}} + \lambda^{-1}{}_{\mathrm{m}} \quad (8)$$

SMSM'un tork eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$T_{\mathrm{e}} = \frac{3}{2}\frac{P}{2} \omega_{mag} i_{\mathrm{qs}} \quad (9)$$

d ve q ekseni akım döngülerinin kontrolü için motorun elektriksel denklemlerinden yararlanmak gerekir. Motorun elektriksel transfer fonksiyondan gelen matematiksel ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\mathrm{İ}m}{Vm} = \frac{1}{Rs + s.Ls} \quad (10)$$



Şekil. 12 Motor elektriksel transfer fonksiyonunun şematik gösterimi

Denklem 10'a göre tasarlanacak olan PI kontrolörün transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir.

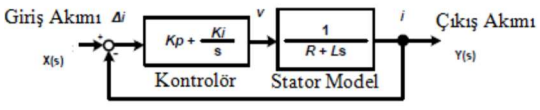
$$Kp + \frac{Ki}{s} \quad (11)$$

d ve q ekseni akımları kontrol döngüsünün Kp ve Ki parametrelerinin matematiksel ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Wn^2}{s^2 + 2\zeta Wns + Wn^2} * \left(1 + \frac{s}{Wz}\right) \quad (12)$$

$$Kp = 2\zeta WnL - R \quad (13)$$

$$Ki = Wn^2 L \quad (14)$$



Şekil. 13 Eksen akımları kontrol döngüsü şeması

Motorun hız kontrolü döngüsü için motorun mekanik karakteristiği kullanılabilir. Motorun hız kontrol döngüsü aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Kba*(1+\frac{s}{a})}{s^2 + Kbs + Kba} \quad (15)$$

$$Ki = Kp * a \quad (16)$$

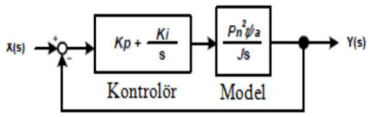
$$Kp = \frac{J}{Kb * P^2 * \Phi} \quad (17)$$

$$Wn = \sqrt{\frac{Kpa\Phi P^2}{J}} \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{KpP^2\Phi}{aJ}} \quad (19)$$

$$Kp = \frac{2\zeta WnJ}{P^2\Phi} \quad (20)$$

$$Ki = \frac{Wn^2 J}{P^2\Phi} \quad (21)$$



Şekil. 14 Eksen akımları kontrol döngüsü şeması

SMSM'un alan yönlendirmeli kontrolünde düzgün bir kontrol için motor parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bildiri kapsamında kullanılan SMSM'un elektriksel parametreleri Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Motor Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Kutup sayısı	6	---
q ekseni indüktansı	17.3	mH
d ekseni indüktansı	17.3	mH
Faz direnci	5.05	ohm
Zır EMK sabiti	45	V/krpm
Nominal akım	0.6	A(rms)
Nominal Gerilim	310	V
Eylemsizlik momenti	0.650	Kgcm2

III. SONUÇLAR

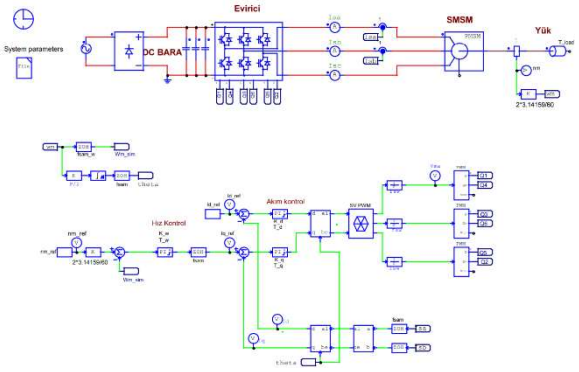
Eksen akımları kontrol döngüsünde optimum parametrelerinin bulunması amacıyla Sistemin doğal frekansı ve sönüm oranına göre farklı değerlerde Kp ve Ki değerleri hesaplanarak bu değerler uygulanarak ölçümler alındı. Tablo 3 de simülasyonda ve gerçek sistemde uygulanan Kp ve Ki parametreleri verilmiştir.

Tablo 3. Eksen akımları döngüsü kontrolcü parametreleri

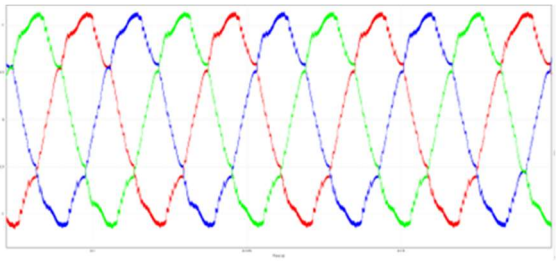
Kp	Ki
0.9	1.03
0.7	0.99
0.5	0.92
0.3	0.85
0.2	0.79

A. Sistemin Simülasyonu

Simülasyon programında sistemin ana donanımı ve alan yönlendirmeli kontrol algoritması oluşturulmuş ve motor parametreleri simülasyon programına girilip sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin simülasyon programındaki şematik gösterimi şekil 15 de verilmiştir. Simülasyon sonuçları şekil 16, 17, 18 ve 19 da verilmiştir.

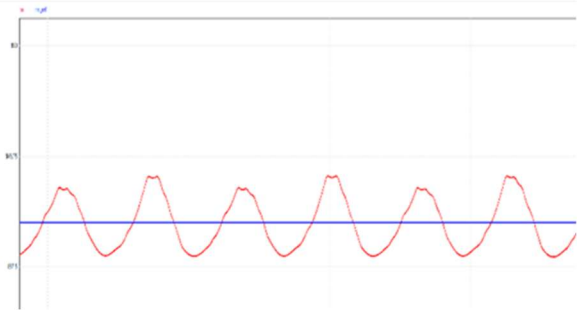


Şekil. 15 Simülasyon programındaki şematik gösterim



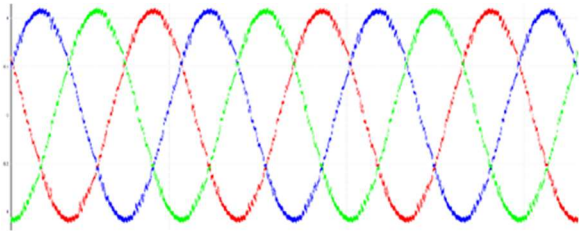
Şekil. 16 840 rpm 0.4 Nm de motor faz akımları.

(Kp = 0.2 Ki = 0.79)



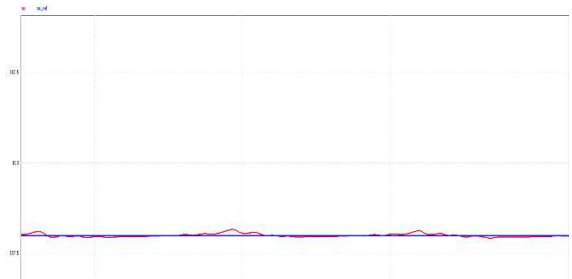
Şekil 17. 840 rpm 0.4Nm de gerçek hız ölçülen hız grafiği.

(Kp = 0.2 Ki = 0.79)



Şekil. 18 840 rpm 0.4 Nm de motor faz akımları.

(Kp = 0.9 Ki = 1.03)



Şekil. 19 840 rpm 0.4Nm de gerçek hız ölçülen hız grafiği.

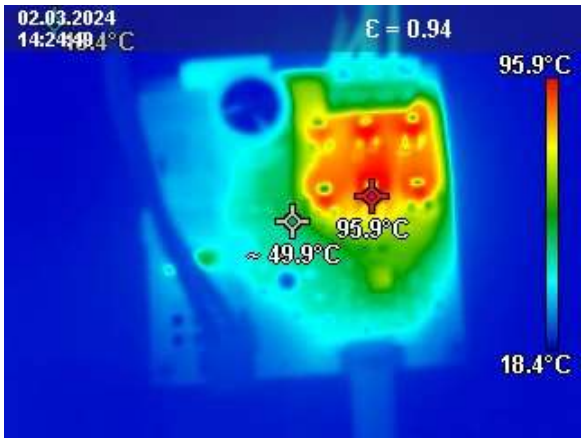
(Kp = 0.9 Ki = 1.03)

B. Sistemin Gerçeklenmesi

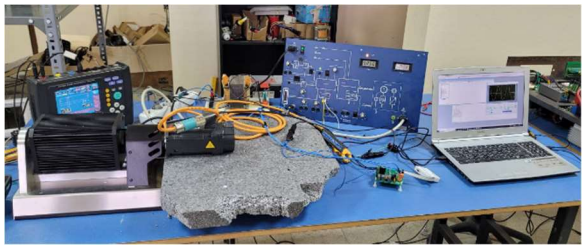
Sürücü kartının donanım ve PCB tasarım aşaması tamamlanarak sürücü kartının motor ile testleri gerçekleştirildi. Sürücü kartının tasarımı bitmiş hali şekil 20 de verilmiştir. Sürücünün termal sonuçları şekil 21 de verilmiştir. Test sisteminin görseli şekil 22'te verilmiştir. Motor 840 RPM 0.4 Nm tork değerime ulaşacak şekilde test düzeneğinde test edildi. Akım kontrolcüsünün Kp ve Ki parametreleri Tablo 3 deki gibi belirlenerek Motor faz akımının Toplam harmonik bozunum değeri THD ölçüldü. Tablo 4'te Ölçülen harmonik bozunum değerleri belirtilmiştir. Anahtarlama sinyallerinin dalga şekli şekil 23'te verilmiştir. Motor faz akımı ve motor ölçülen hız bilgisinin grafiği şekil 24 ve 25'te verilmiştir.



Şekil. 20 Sürücü kartı



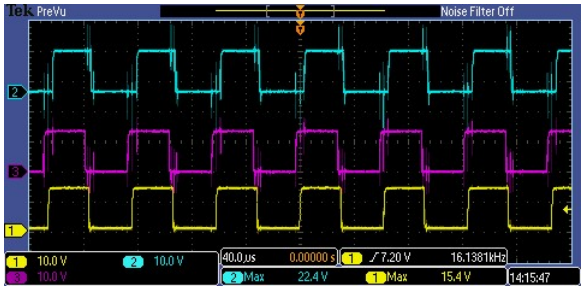
Şekil. 21 Sürücü kartı termal görüntüsü



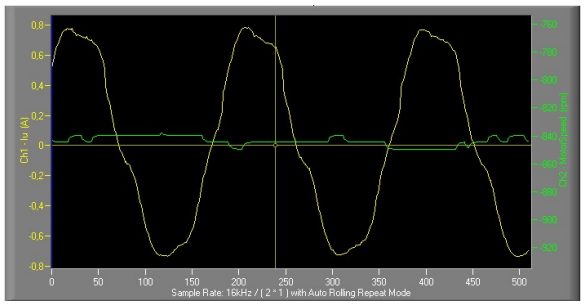
Şekil. 22 Sistem test kurulumu

Tablo 4. Motor Faz akımları THD sonuçları

Kp	Ki	THD
0.9	1.03	8.85
0.7	0.99	7.86
0.5	0.92	7.62
0.3	0.85	7.07
0.2	0.79	6.23

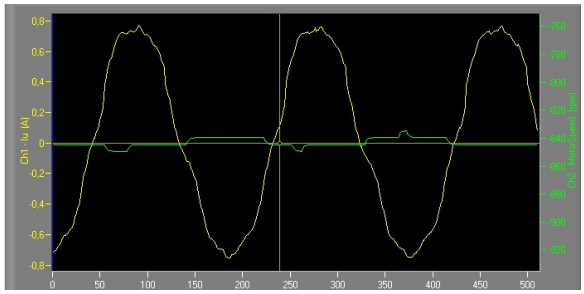


Şekil. 23 Anahtarlama sinyalleri (low side)



Şekil. 24 Motor tek faz akımı ve motor ölçülen hız

(Kp= 0.1 Ki = 0.79)



Şekil. 25 Motor tek faz akımı ve motor ölçülen hız

(Kp= 0.9 Ki = 1.03)

IV. TARTIŞMA

Sabit mıknatıslı senkron motorda tork ve akı kontrolü için motorun elektriksel denklemlerinden elde edilecek bir şekilde kontrolcü tasarımı yapılmalıdır. Bu çalışmada farklı kontrolcü parametrelerinde akım harmoniğinin etkisi gözlenmiştir. Kontrolcü parametrelerinin değişimi ile harmonik bozunum yaklaşık %30 azaldığı gözlemlenmiştir. Sürücü kartı sıcaklığı üzerindeki malzemelerin dayanımına bağlı olarak belli bir seviyeyi aşmamalıdır. Sürücü kartlarında en yüksek sıcaklık genel olarak güç anahtarlarının bulunduğu alanda oluşur. Bu alanın soğutulması soğutucu bir heat sink ile veya PCB güç anahtarlarının bulunduğu hat üzerindeki bakır alanın arttırılması ile yapılabilir. Çalışma kapsamında tasarlanan sürücü

kartında bakır alanın arttırılması yöntemi kullanılmıştır ve sürücü maksimum sıcaklığı 96 derece olarak ölçülmüştür.

V. ÇIKARIM

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun kontrolünde maksimum verim ve tork için, motor faz akımları sinüzoidal akım şeklinde olmalıdır. Akım kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu ile motor faz akımları sinüzoidal forma yaklaştırılabilir. İleriki çalışmalarda kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu ile alakalı çalışmalar ve güç faktörü düzeltilmesi amacıyla sürücünün tasarımına ek güç faktörü düzeltici devresi tasarımı üzerine çalışmalar yürütülebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde desteklerini esirgemeyen İnform Elektronik AR-GE Merkezi ve Düzce Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Q. Lin, Q. Zheng, S. Miao, Y. Li ve R. Zhao, "Comparison of PMSM and BLDC Applications in Servo System," *International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering,* pp. 67-74, 2589-4943, 2022.

[2] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC motor Drives," *New York : CRC Press, Taylor and Francis group*, 2010.

[3] J.S. Sadhak and S. Bhusnur, "Sensorless zero back EMF method for in rotor position control of BLDC motor drive," *Research Journal of Engineering Sciences*, 6(7), 2278-9472, 2017.

[4] A. S. Cabuk, "Sensorless Control of Outer Rotor Brushless DC Motor With Back-EMF Observer for Drone," *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, vol. 9, No.4 2147–284X, Oct. 2021.

[5] M. Hein, "Demystifying BLDC motor commutation; Trap, Sine, & FOC," TI Tech Days, slyp711, 2020.

[6] B. Akin, M. Bhardwaj ve Jon Warriner, "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors," Texas Instruments sprabz4 application note, 2011.

[7] M.T. Ratcliffe and K.A. Gamage, "BLDC Motor Power Control Techniques Appraisal: Novel current control technique," *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2155-5532, İstanbul, 2013.

[8] H.W. Park, M.H. Lee, F. Harashima ve S.J. Park, "A new approach for minimum-torque-ripple maximum-efficiency control of BLDC motor," *IEEE Industrial electronics*, vol. 47, no. 1, pp 109-114, 2000.

[9] M.T. Ratcliffe and K.A. Gamage, "BLDC Motor Power Control Techniques Appraisal: Novel current control technique," *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2155-5532, İstanbul, 2013.

[10] Microsemi, "Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motors," *Users Guide* Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motors UG (microsemi.com).

[11] V. K. Pavuluri, X. Wang, J. Long, G. Zhuo ve W. Lian, "Field Oriented Control of Induction Motors Using Symmetrical Optimum Method with Applications in Hybrid Electric Vehicles," *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montreal, QC, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2015.7352948.

[12] R. Gabriel, W. Leonhard ve C. J. Nordby, "Field-Oriented Control of a standart AC Motor Using Microprocessors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1980, pp. 186-192, doi: 10.1109/TIA.1980.4503770.

[13] T. Rekioua, F. M. Tabar ve R. le Doeuff, "A new approach for the field-oriented control of brushless, synchronous, permanent magnet machines," *1990 Fourth International Conference ın Power Electronics and Variable-Speed Drives,* 1990, pp. 46-50, Londra.

[14] T. Rekioua, F. M. Tabar ve R. le Doeuff, "A new approach for the field-oriented control of brushless, synchronous, permanent magnet machines," *1990 Fourth International Conference ın Power Electronics and Variable-Speed Drives,* 1990, pp. 46-50, Londra.

[15] C. De Angelo, G. Bossio, J.Solsona, G. O. Garcia, and M. I. Valla, "A rotor position and speed observer for permanent magnet motors with nonsinusoidal EMF waveform," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol.52, no.3, pp. 807-813, doi: 10.1109/TIE.2005.847582, 2005.

[16] Infineon Technologies AG, "IMD111T/IMD112T- iMotion driver for motor control" *Datasheet,* Münih, 2023.

[17] M. Eşer, "Sirkülasyon pompası uygulamalarında kalıcı mıknatıslı senkron motorun vektör kontrolü ve EEI optimizasyonu," *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi),* 120s, Kocaeli, 2020.

[18] T. Odabaşı, "Simulation and circuit design of an inverter with sensorless field oriented control for a PMSM used in compressor," *İTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi),* 202s, İstanbul, 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yüksek Sıcaklık-Yüksek Çevrim Yorulma Test Cihazı Tasarımı

Osman Tuna Gökgöz[a,b], Hüdayim Başak[a]*

[a]Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
[b]TR Mekatronik A.Ş., Üretim Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: osmantuna.gokgoz@gazi.edu.tr

ÖZET

Malzemelerin tekrarlı dinamik yükler altında gösterdiği dayanım, yorulma dayanımıdır. Yorulma dayanımı, termal gerilimlere de maruz kalabilen kritik parçalar için birincil derecede dikkat edilmesi gereken bir husustur. Özellikle eklemeli imalat (Eİ) yöntemleriyle üretilen, yüksek sıcaklık altında çalışan ve kritik görevler üstlenmesi beklenen parçaların yorulma performansının deneysel çalışmalarla ortaya çıkarılması önemlidir. Günümüzde Eİ yöntemlerinin yaygınlaşmasıyla beraber Eİ ile üretilen süper alaşımların güvenilirliği de başlıca araştırma konularından biridir. Buna rağmen yorulma testlerinin maliyetleri yüksek olduğundan dolayı deneysel çalışmalar yaygınlaşamamakta, deney yapma imkanına sahip olanlar ise konuyla ilgili standartlar tam olarak ihtiyaçları karşılayamadığı için sonuçlarını literatürde yer alan diğer deneyler ile karşılaştıramamaktadırlar. Bu çalışmada, Eİ ile üretilen Ti6Al4V test kuponlarına düşük maliyetli yüksek sıcaklık yüksek çevrim yorulma testi uygulanabilmesi için döner çubuklu eğme gerilmeli yorulma yöntemiyle çalışacak bir tasarım sunulacaktır. Bu düzeneğin amacı, birim test maliyetlerinin ve birim test sürelerinin azaltılmasıdır. Düşürülen maliyet ve sürelerle birbirleriyle karşılaştırılabilir daha çok sayıda yorulma testi yapılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat (Eİ), yorulma, Ti6Al4V, test düzeneği.

The Design for Elevated Temperature-High Cycle Fatigue Test Set-up

Osman Tuna Gökgöz[a,b], Hüdayim Başak[a]*

[a]Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Industrial Design Engineering Department, Ankara/Türkiye.
[b]TR Mekatronik Inc., Manufacturing Department, Düzce/Türkiye.
*Corresponding Author: osmantuna.gokgoz@gazi.edu.tr

ABSTRACT

The strength of materials under repeated dynamic loads is fatigue strength. Fatigue strength is a primary consideration for critical parts that may also be exposed to thermal stresses. It is especially important to reveal the fatigue performance of parts produced by additive manufacturing (AM) methods, operating under high temperatures and expected to undertake critical tasks, through experimental studies. Nowadays, with the widespread use of AM methods, the trustworthiness of superalloys produced with AM is one of the main research topics. However, due to the high costs of fatigue tests, experimental studies cannot become widespread, and those who have the opportunity to conduct experiments cannot compare their results with other experiments in the literature because the standards on the subject do not fully meet the needs. In this study, a design that will work with the rotating bar bending stress fatigue method will be presented in order to apply low-cost high temperature high cycle fatigue test to Ti6Al4V test coupons produced with Eİ. The purpose of this set-up is to reduce unit test costs and unit test duration. It is aimed to perform more fatigue tests that are comparable to each other with reduced costs and duration.

Keywords: Additive Manufacturing (AM), fatigue, Ti6Al4V, test set-up.

I. INTRODUCTION

The experiments for fatigue strength of AM metals are one of the bottle necks of the test, qualification, and validation processes. As a modern manufacturing method, AM needs lots of test and analyses to be accepted by the engineering community. The resistance and question marks in designers mind can only be eliminated with more and reliable experiments. As a result of high costs for fatigue testing and the long time needed to complete the tests, there are not adequate number of experimental studies in the open sources to the authors' knowledge. In this study, the design for accelerated fatigue test set-up is presented.

II. MATERIAL AND METHOD

Ti6Al4V is a titanium alloy renowned for its alpha-beta phase composition, commonly utilized across engineering sectors including aerospace and medical fields. "Titanium is a strong, lightweight, corrosion resistant metal... which... alloys are often considered to be high-temperature engineering materials because of the good mechanical properties are retained up to temperatures between 425° and 595°C... On the negative side, titanium and its alloys suffer from high cost, fabrication difficulties, a high energy content, and a high reactivity at elevated temperatures (above 535°C)"[1]

The mechanical properties encompassing tensile strength, ductility, toughness, hardness, and fatigue resistance serve as basic parameters in evaluating materials for specific service conditions. The acquisition of reliable engineering data necessitates lots of tests to ascertain these characteristics accurately. Moreover, the testing conditions must simulate operational environments to yield precise predictions concerning real-world applications. Despite the common exposure of titanium alloys to high temperatures in aerospace applications, the majority of mechanical tests are conventionally conducted at room temperature. Furthermore, while assessing additively manufactured materials, it's crucial to note that although the standard test specimens are typically machined and polished, the inherent poor surface quality fails to replicate actual operational conditions [2,3] (Figure 1). Notably, surface quality exerts a significant influence on the fatigue performance of components.

With regard to long durations to complete high cycle tests (10 Hz, 10^7 cycles, ~12 days/specimen), the possible ways of shortening the test duration are also investigated. The fatigue testing machines from early days of fatigue investigations to date are reviewed and a new kind of patent pending high temperature high cycle rotational bending fatigue test machine design is proposed.

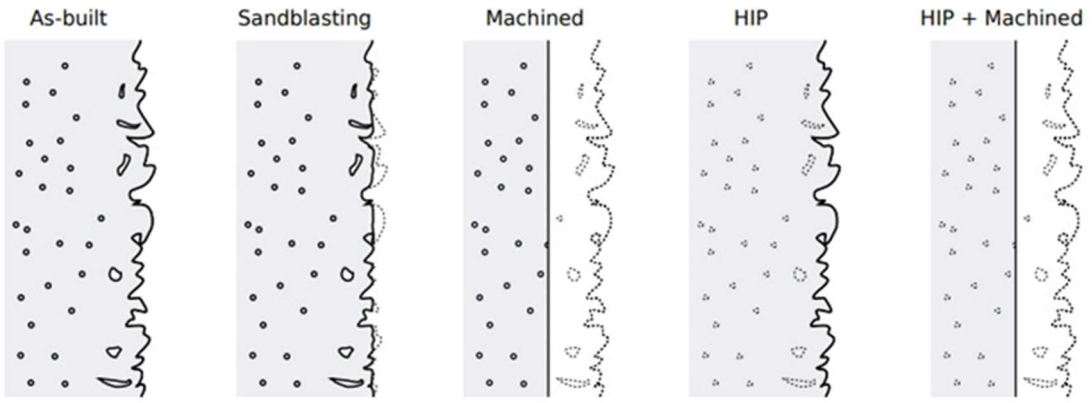


Figure 1. Surface roughness and pores distribution before and after post-processes [3]

A. Design Considerations

Initially, an examination of existing designs is undertaken to tailor a novel machine to suit contemporary requirements. Early fatigue test machines (Figure 2, 3) were predominantly mechanical in nature and lacked electronic control systems integrated with sensors. Contrastingly, modern fatigue machines boast advanced control systems and sensor technology. In the pursuit of devising a cost-effective testing setup, rotational bending type fatigue machines are preferred due to their relatively simple structure and adaptability for concurrent testing of multiple components. It is worth noting that even in earlier machine designs, provision was made for synchronous testing of multiple parts within a single setup.

The construction of S-N (stress versus number of cycles) diagrams serves as a fundamental method for elucidating the fatigue strength characteristics of materials, necessitating a minimum of 15-20 successful

fatigue tests for high cycle applications [2]. In the design of the test setup, the objective is to conduct synchronous testing of 12 coupons. In traditional approaches, each part is individually heated to 500°C and tested sequentially, thereby prolonging the overall test duration as the sum of 12 consecutive tests, in addition to setup durations required for constructing the S-N diagram. Conversely, in the current setup, all coupon tests commence simultaneously. Forces are applied to each part using dead weights or springs, with the anticipation that failure will occur successively in the coupons subjected to higher forces. Consequently, data collection for constructing the S-N diagram is facilitated within the duration of the longest test, resulting in reduced time and energy consumption required to maintain the parts within a consistent heated test environment.

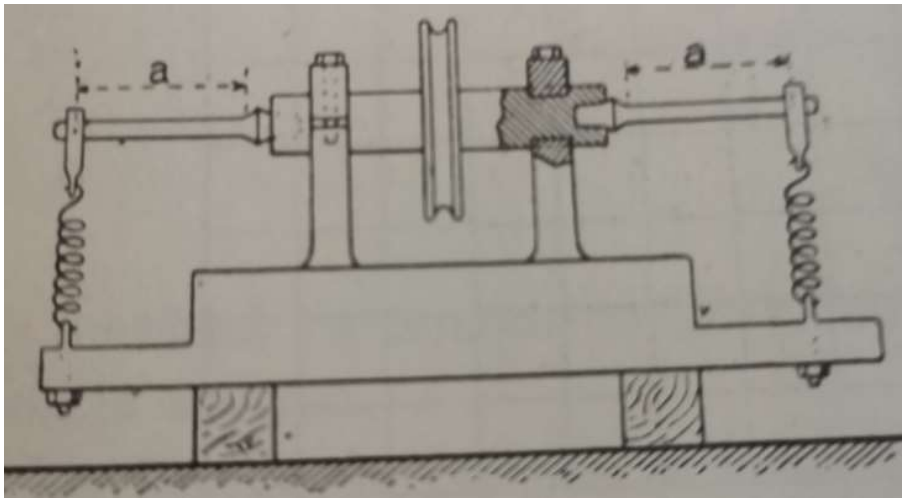


Figure 2. Fatigue Test Machine [4]

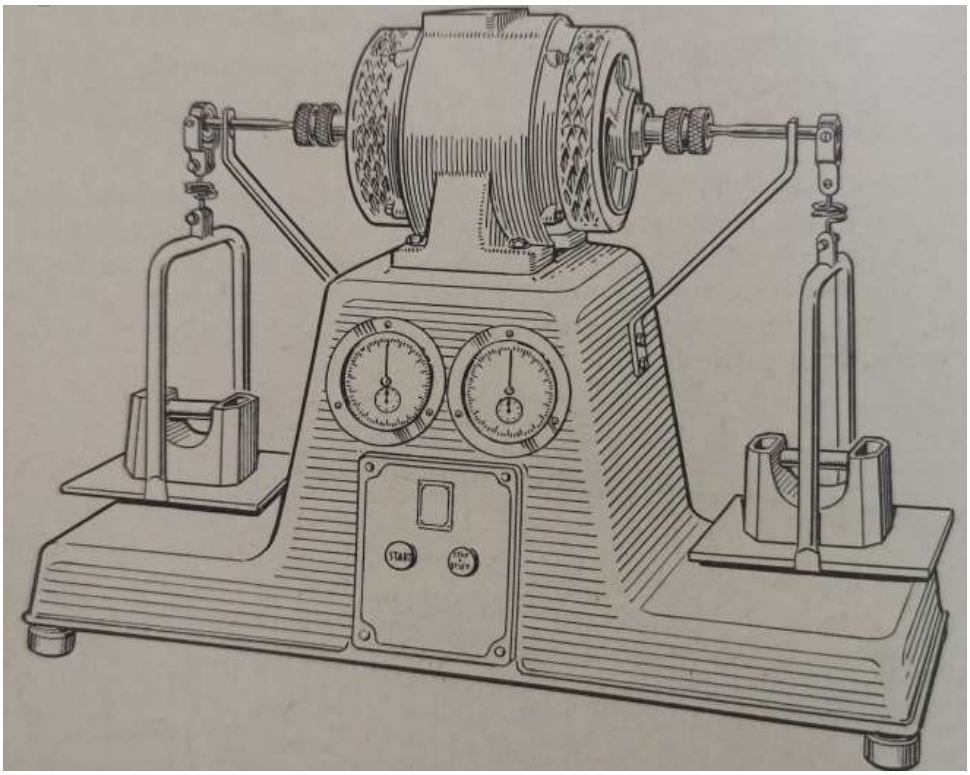


Figure 3. Fatigue Test Machine [5]

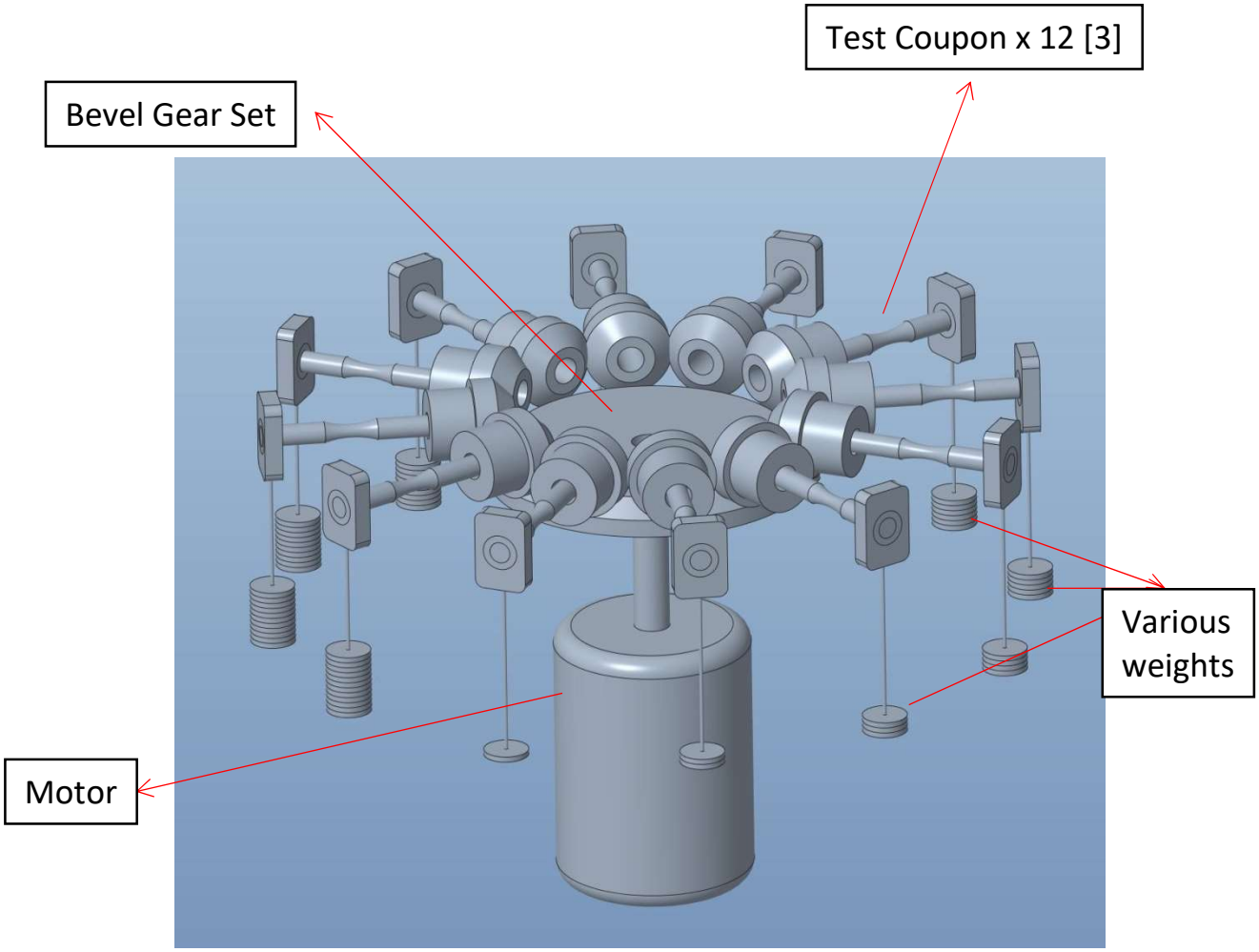


Figure 4. Simplified Version of Multiple Parts Fatigue Test Set-up (Patent Pending)

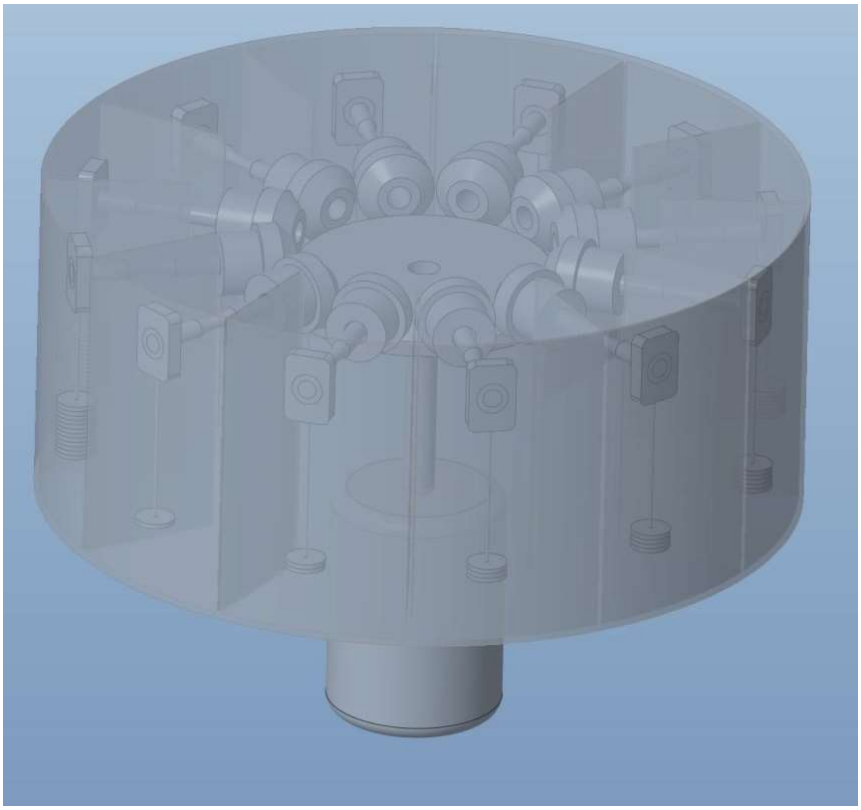


Figure 5. Insulated chamber for tests at elevated temperature

III. Results & Discussions

By the proposed design, the fatigue tests for AM metals will be at least 40% shorter, greener, more economical, and accessible. More successful tests mean more reliable results to ensure trustworthiness of the AM parts. This set-up is also can be used for the parts manufactured with conventional method as subtracitve methods and casting etc. For AM, there are hundreds of parameters may affect the performance of the parts. To investigate their effects on fatigue properties of materials, more tests are needed. This set-up with academy-friendly design structure will enable cheaper and shorter experiments.

Acknowledgedment

Hyrum Lefler from IperionX is acknowledged for the technical discussions about the set-up and possible implementations.

References

[1] Degarmo's Materials and Processes in Manufacturing, Black, Kohser, 2019 John Wiley & Sons,13th Edition, p119.
[2] Tahribatlı Malzeme Muayenesi ve Analizi Yöntemleri, Süleyman Karadeniz, Özlem Karadeniz, 2018 MMO, p136.
[3] Klas Solberg, Fatigue design for metallic components produced by additive manufacturing, NTNU PhD Thesis, 2021
[4] La Fatigue Des Metaux, R. Cazaud, 1948 Dunod, 3rd Edition, p78.
[5] Engineering Inspection, A.C.Parkinson, 1967 Sir Isaac Pitman & Sons Ltd, 4th Edition, p38.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Sektörde Güneş Enerji Santralleri Kurulum Analizleri

Gökhan SEZGİN[a], Zehra YUMURTACI[b]*

[a]Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b]Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** gokhan.sezgin@std.yildiz.edu.tr

ÖZET

Dünya'da yaşamın sürdürülebilmesi için gerekli olan gıda, barınma, ulaşım gibi en önemli ihtiyaçların karşılanmasında elektrik enerjisi önemli yer tutmaktadır. Elektrik enerjisi üretilmesinde fosil kaynaklar başta olmak üzere, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı da artmaktadır. Yıllar içerisinde zamanla azalan fosil enerji kaynaklarının yerine alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve bu kaynaklardan elektrik enerjisi üretebilme çalışmaları önem kazanmıştır. Özellikle Güneş enerjisinden yararlanılarak elektrik enerjisi üretilmesi son yıllarda gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Bu araştırmada, İstanbul Büyükçekmece'deki 25MW kurulu gücü olan işletmeye 11,425 MW Güneş Enerji Santrali kurulumunun fizibilite raporu hazırlanmış, yapılacak hesaplamalar adım adım gösterilmiş, panel verimi, dizi sayısı hesaplamaları, bara ve termik şalter seçimi için hesaplamalar, DC ve AC kablo hesaplamaları anlatılmıştır. Sonuç olarak yapılan ölçümlerde 1 saat 7 dakika süre içerisinde güneş panellerinden üretilen güç değeri 4.338 kW olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Güneş Enerji Santrali, Güneş Paneli, Hesaplamalar*

Solar Power Plant Installation Analyses in the Sector

Gökhan SEZGİN[a], Zehra YUMURTACI[b]*

[a]Yildiz Technical University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Istanbul/Türkiye.
[b] Yildiz Technical University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Istanbul/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** gokhan.sezgin@std.yildiz.edu.tr

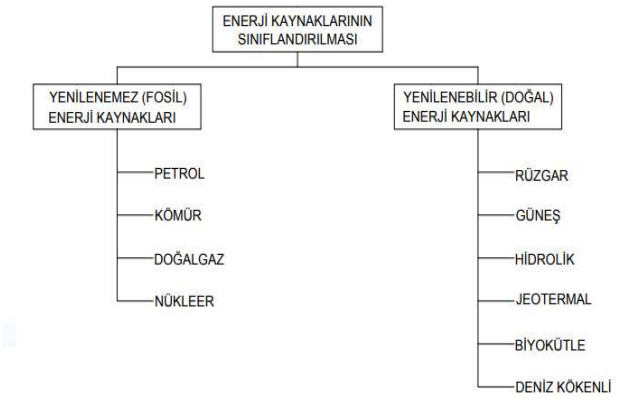
ABSTRACT

Electric energy has an important place in meeting the most important needs such as food, shelter and transportation, which are necessary for the sustainability of life in the World. The use of renewable energy sources, especially fossil resources, in the production of electrical energy is also increasing. Over the years, the search for alternative energy sources instead of fossil energy sources that have decreased over time and the efforts to produce electrical energy from these sources have gained importance. Especially the generation of electrical energy by utilizing solar energy has developed and become widespread in recent years. In this study, the feasibility report for the installation of an 11,425 MW Solar Power Plant with an installed capacity of 25 MW in Istanbul Büyükçekmece was prepared, the calculations to be made were shown step by step, panel efficiency, array number calculations, calculations for busbar and thermal switch selection, DC and AC cable calculations were explained. As a result, the power generated from solar panels in 1 hour and 7 minutes is 4.338 kW.

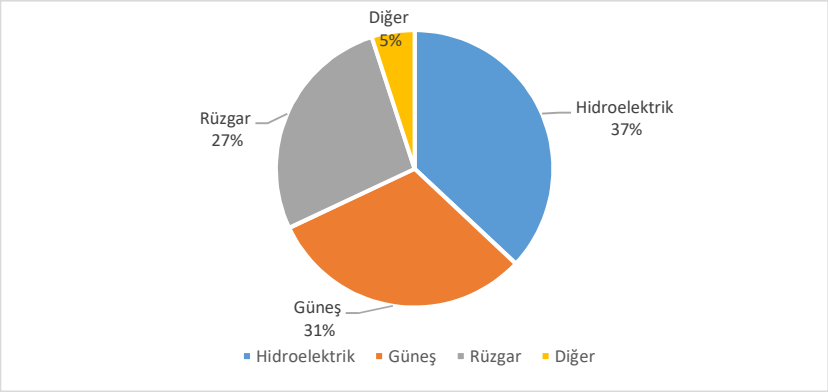
Keywords: *Solar Power Plant, Solar Panel, Calculations*

1. GİRİŞ

Dünya'da artan nüfus ve buna bağlı olarak tüketim oranındaki artış üretimdeki talebin artmasına ve dolayısıyla enerjiye olan ihtiyacın gün geçtikçe artması ve öneminin de artmasına sebep olmaktadır. Elektrik enerjisi elde edilmesinde öncelikle temel bir kaynağa ihtiyaç duyulur. Bu temel kaynaklar doğada sınırlı halde bulunan kömür, petrol, doğalgaz, uranyum gibi fosil halde bulunan yenilenemez (tükenebilen) kaynaklar ve güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal gibi kendini sürekli yenileyen, yenilenebilir (tükenmeyen) kaynaklardır. Enerji Kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar olmak üzere 2'ye ayrılır.

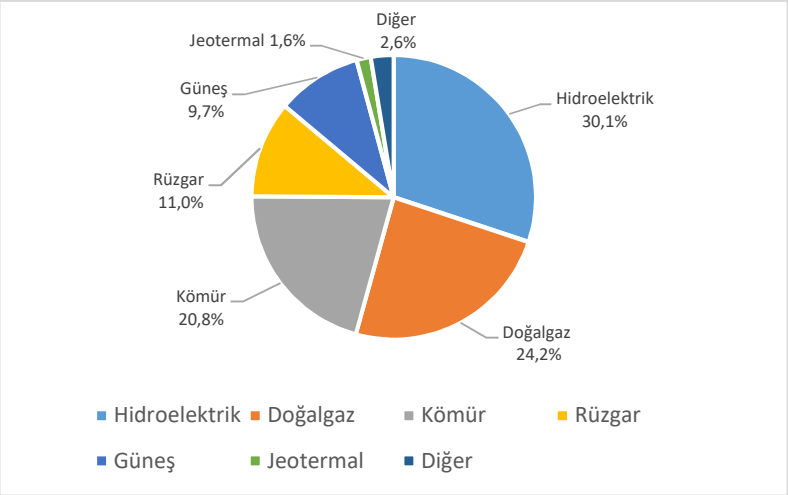


Şekil 1. Enerji kaynakları [1]



Şekil 2. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre Dünya'da 2022 yılı kurulu kapasite dağılımı [2]

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını ayrı olarak ele aldığımızda ise Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yapılan araştırmada 2022 yılı sonu itibariyle yenilenebilir enerji kaynakları kurulu güç kapasitesi 3.372 GW tır. Yenilenebilir kaynaklar içerisindeki en büyük pay % 37 ile hidroelektrik kaynağa, onu sırasıyla % 31 ile güneş ve % 27 ile rüzgâr enerjisi kaynakları takip etmektedir.



Şekil 3. Kaynaklara göre Türkiye'nin 2022 yılı kurulu gücün dağılımı [3]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 21.07.2023 tarihinde belirttiği çalışmasında, Türkiye'nin 2023 yılı Haziran ayı kurulu gücü 104.904 MW tır. 2023 yılı Haziran sonu verilerine göre Türkiye'mizin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımında ilk sırada % 30,1 hidroelektrik, % 24,2 doğal gaz, % 20,8 kömür, % 11 rüzgar, % 9,7 güneş, % 1,6 jeotermal ve % 2,6 sı diğer kaynaklardan oluşmaktadır. Burada yenilenebilir kaynakların payı yaklaşık % 52,4 oranına yükselmiştir ve yenilenebilir kaynaklardan yararlanma, elektrik üretimi ve kullanımı gün geçtikçe daha da artmaktadır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından Güneş temel bir enerji kaynağıdır. Çekirdeğinde füzyon reaksiyonu ile hidrojen gazının helyuma dönüşmesi ile açığa çıkan enerjiden oluşur. Güneş enerjisinden çeşitli yöntemler kullanılarak ısıtmada, elektrik enerjisi üretme gibi birçok alanda yararlanılabilir. Fotovoltaik piller vasıtası ile güneş ışığından elektrik enerjisi üretilebilir, güneş toplaçları ile su veya havayı ısıtarak ısı enerjisi üretilmesi ve yoğunlaştırıcılar ile (parabolik veya çanak şeklinde) belirli bir akışkanı ısıtıp buhar üretmek için kullanılabilirler. [4]

Yıllar içerisinde Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının özelliklede güneş kaynaklı enerjinin kurulu gücü artış göstermiştir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (IRENA) yaptığı çalışmada Türkiye'deki güneş enerjisi kurulu gücünün 2013-2022 yılları arasındaki kapasite dağılımı Tablo 1'de gösterilmiştir.

***Tablo 1. Türkiye ve Dünya'daki güneş enerjisi kurulu kapasitesi yıllar içindeki* değişimi (2013-2022) [5]**

Yıllar	Türkiye Güneş Enerjisi Kurulu Kapasite (MW)	Dünya Güneş Enerjisi Kurulu Kapasite (MW)
2013	19	140.514
2014	41	180.712
2015	250	228.920
2016	834	301.082
2017	3.422	395.947
2018	5.064	489.306
2019	5.996	592.245
2020	6.668	720.429
2021	7.817	861.537
2022	9.426	1.053.115

Ülkemizde 2013 yılında 19 MW olan güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi 2022 yılı sonunda 9.426 MW a yükselmiştir. Dokuz yıl içerisindeki Türkiye güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi 9.407 MW artmıştır. Bu artış güneş enerjisi kullanmanın ülkemiz için ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

Dünya'da ise 2013 yılında 140.514 MW olan güneş enerjisi kurulu kapasitesi 2022 yılı sonunda 1.053.115 MW a çıkmıştır. Güneş enerjisindeki bu gelişme istihdam artışına da doğrusal olarak etki ederek birçok kişiye iş olanağı sağlamıştır.

Ülkemize baktığımız zaman Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) 2021 sonu verilerine göre Türkiye'de toplam elektrik enerjisi üretiminin % 4,17 si (13.942 GWh) güneş enerjisinden elde edilmiştir. 2022 sonu verilerine göre güneş enerjisinden elektrik üretimi artış göstererek toplam elektrik enerjisi içerisindeki payı % 5,1 e (16.887 GWh) yükselmiştir.

Tablo 2. Türkiye'deki Güneş kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin 2021-2022 dağılımı [6]

Yıllar	Toplam Elektrik Üretimi (GWh)	Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi (GWh)	%
2021	334.723	13.942	4,17
2022	328.379	16.887	5,10

Güneş enerjisinden elektrik üretimi gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu durum çevre kirliliğinin önlenmesi, yeni iş kolları gelişerek istihdamın artması ve ülke cari açığının azalması yönünde olumlu etki göstermektedir.

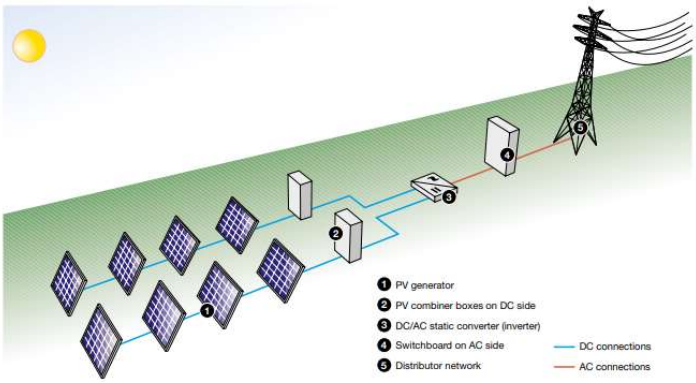
2.1 Güneş Enerjisi Fotovoltaik Sistem Tasarımı

Güneş enerjisinden fotovoltaik sistem ile elektrik enerjisi üretimi kurulum aşamasında şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler olmak üzere 2 kısımda incelenir.

2.1.1 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistem

Üretilen elektrik mülk sahibi tarafından kullanılır veya elektrik şebekesine geri gönderilir. Güneş panelleri gece karanlığında yeteri kadar güç üretemezler ve ihtiyaç duyulan elektrik şebekeden sağlanır. Özetle tüketilen enerji fotovoltaik sistemin ürettiği enerjiden fazla ise ihtiyaç duyulan kalan enerji şebekeden sağlanır. Eğer sistemin ürettiği enerji tüketilen enerjiden fazla olduğu durumlarda üretilen enerji şebekeye geri gönderilir. Şebekeden alınan ve verilen enerji 2 ayrı sayaç ile okunur.

Çift yönlü sayaç sayesinde hem üretilen elektriğin değeri hem de tüketilen elektrik değeri belirlenmiş olur. Elektriğin fazla üretilmesi durumunda fazla elektrik sisteme geri verileceği için şebekeye bağlı sistemlerde akü kullanılmasına ihtiyaç duyulmaz. [7]



Şekil 4. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem [8]

Şebekeye bağlı sistemlerde kullanılan ekipmanlar aşağıda belirtilmiştir.

1-) Güneş paneli

2-) DC bağlantı panosu

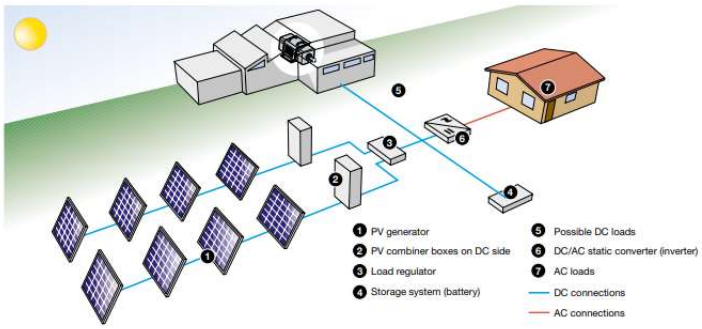
3-) İnverter

4-) AC bağlantı panosu

5-) Dağıtım hattı

2.1.2 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistem

Bu sistem genellikle güç hattı uzakta olan noktalarda ise kurulması uygundur. Şebekeye bağlı olmayan ve enerjiyi depolama yöntemi ile kurulan sistemlerdir. Güneş panelleri ile üretilen elektrik enerjisi akü vasıtası ile depolanır. Akülere dolan enerji güneş paneli yetersiz kaldığında aküler vasıtasıyla sistem beslenir. Akü bu sistemin en önemli ekipmanlarındandır. Bunun sebebi ise aküler yeniden depolanabilir özellikte olmalıdır. Akülerde DC güç olarak depolama gerçekleşir. Günlük hayatta kullanılabileceğimiz elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için DC gücü AC güce çeviren inverter vasıtası ile sağlanır. Tek kullanımlık akülerde bu özellik bulunamadığından depolanabilir aküler tercih edilir bu nedenle sistemin maliyeti yüksektir. [9]



Şekil 5. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem [10]

Şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılan ekipmanlar aşağıda belirtilmiştir.

1-) Güneş paneli

2-) DC bağlantı panosu

3-) Şarj regülatörü

4-) Akü

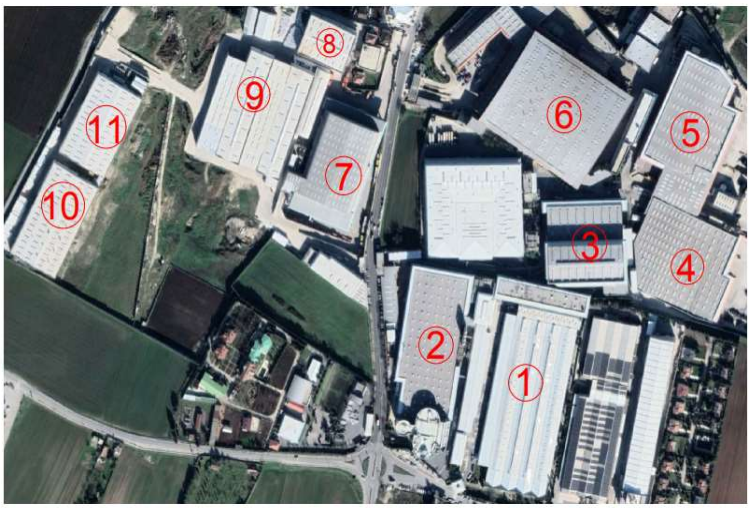
5-) DC yük

6-) İnverter

7-) AC yük

3. GÜNEŞ SANTRALİ PROJE FİZİBİLİTESİ

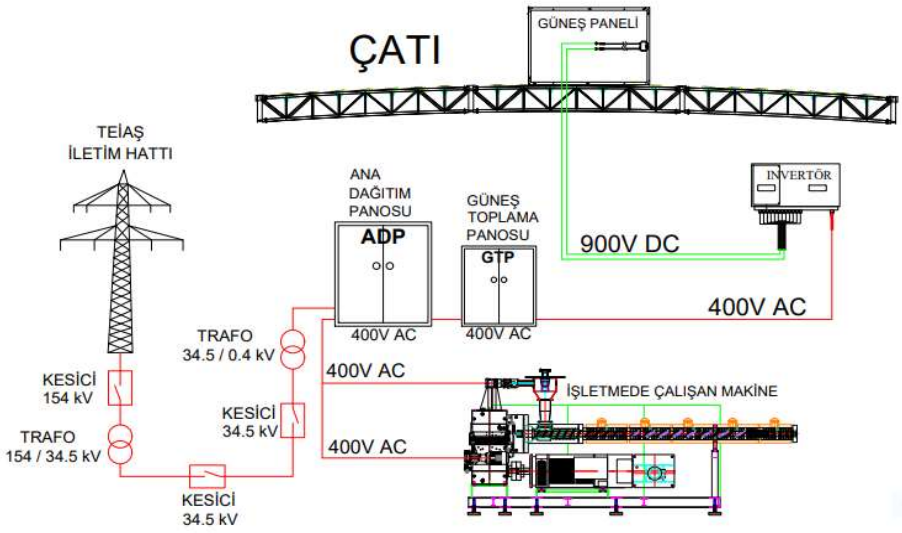
İstanbul ili Büyükçekmece bölgesindeki işletmemize kurulacak çatı tipi güneş enerjisi santrali kurulumu yapılması planlanmıştır. Kurulacak santral 11,425 MW gücündedir. Kurulacak santral şebeke bağlantılı sistem olarak kurulumu yapılmıştır.



Şekil 6. Kurulacak güneş santrali çatı bölgeleri

Çatı taşıyıcı sistemi prefabrik ve kaplaması sandviç paneldir. Toplam çatı alanı 125.060 m^2 olup 11 ayrı çatı bölgesi üzerine güneş santrali kurulmuştur.

3.1 Sistemin Çalışma Prensibi



Şekil 7. Sistemin genel çalışma şeması

Çatı üzerine kurulumu yapılan güneş panellerinden DC kablo ile gelen enerji, 900 V olarak yine DC kablolar vasıtası ile inverterlere bağlantısı yapılır. İnverterden çıkan 400 V enerji AC kablolar vasıtası ile GTP (Güneş Toplama Panosu) bağlanır. GTP panosundan çıkan 400 V enerji AC kablo bağlantısı ile yine 400 V olarak ADP (Ana Dağıtım Panosuna) bağlantısı yapılır. ADP panosundan 400 V ile çıkan gerilim kesici vasıtası ile 34,5 kV seviyesine çıkar. Kesici yük altında trafoyu devreye alıp çıkarır. Daha sonra 34,5 kV seviyesinde şalt sahasındaki 154/34,5 kV trafo üzerinden kesici vasıtası ile 154 kV seviyesine çıkartılarak TEİAŞ iletim hatlarına bağlanır. Bunun dışında ayrıca güneş santrali sisteminden ayrı olarak Ana Dağıtım Panosundan (ADP) 400 V gerilim ile çıkan enerji işletme alanındaki makinelerin enerji beslemesi yapılır.

Güneş santralinin ürettiği kadar enerji makineleri beslemede kullanılır. Güneş santralinden üretilen enerjinin yetmediği durumlarda TEİAŞ hattıyla paralel bağlantılı olduğu için ihtiyaç duyulan enerji TEİAŞ hatlarından çekilerek işletmedeki makinelerin enerji ihtiyacı karşılanır.

3.2 Güneş Santrali Ekipman Bilgileri

3.2.1 Güneş Paneli Mekanik Özellikleri

Kullanılan panel Schmid Pekintaş SPE 500 modeli olup kurulumda toplam 26.457 adet panel kullanılmıştır.

Tablo 3. Güneş paneli mekanik özellikleri

Kullanılacak hücre	Tek Kristalli (Monokristal) PERC M10
Güneş panel markası	Schmid Pekintaş SPE 500
Güneş paneli ebatları	2.100 x 1.140 x 35 mm
Güneş paneli alanı	2,39 m2
Hücre sayısı	132 hücre
Panel ağırlığı	26 kg ±1
Ön cam	3,2 mm yüksek geçirgenlik ve düşük demir oranına sahip temperlenmiş cam
Enkapsülasyon	EVA (Etilen Vinil Asetat)
Arka koruma	PET film
Çerçeve	Eloksal kaplamalı alüminyum
Bağlantı kutusu	IP68 3 bypass diyotlu koruma sınıfı
Konnektör Plug in bağlantısı	MC4 uyumlu
Kablo	4 mm2

3.2.2 Güneş Paneli Elektriksel Özellikleri

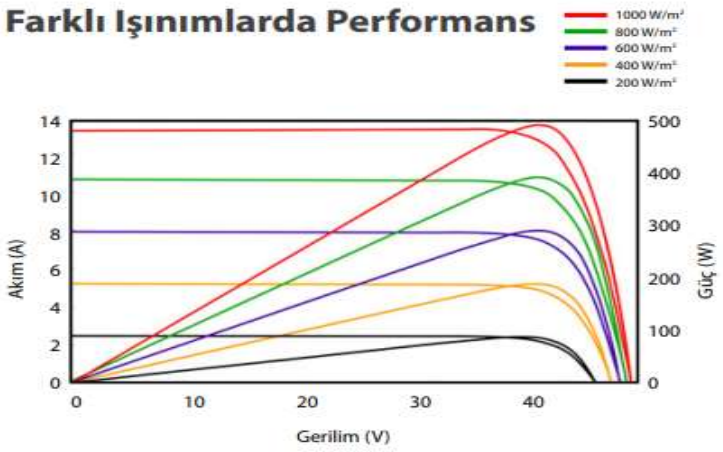
Tablo 4. Güneş paneli elektriksel özellikleri (STC)

Standart test koşulları (STC) altında: Işınım: 1.000 W/m2, Hava kütlesi: 1,5, Hücre sıcaklığı: 25 °C, Ölçüm toleransı: ±%3 değerlerdir, Model: SPE 500	
Maksimum güç (P_{max})	500 Wp
Maksimum güçte gerilim (V_{mpp})	38,46 V
Maksimum güçte akım (I_{mpp})	13,01 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	45,52 V
Kısa devre akımı (I_{sc})	13,80 A
Verim (η)	20,90%

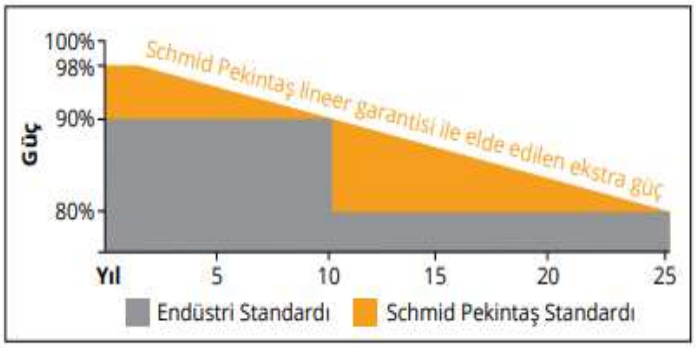
3.2.3 Sistem Özellikleri

Tablo 5. Sistem özellikleri

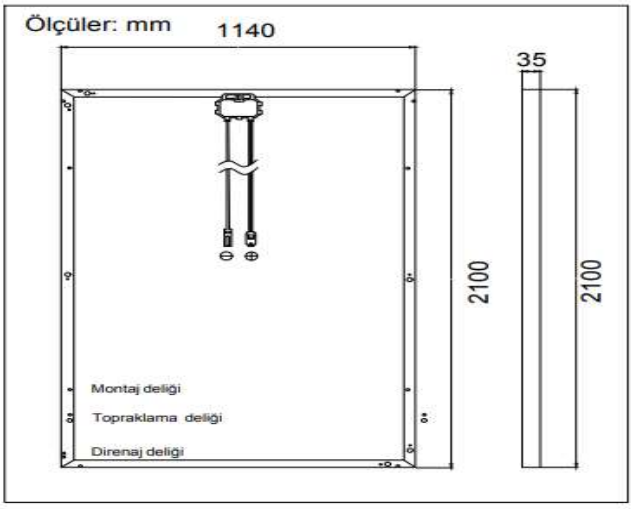
Maksimum sistem gerilimi (V_{sys})	1.500 V DC
İşletme sıcaklığı	-40 °C ~ +85 °C
Maksimum seri sigorta değeri	25 A
Maksimum statik yük	5.400 Pa
Yangın sınıfı	UL Type 1
Güç sıcaklık katsayısı (TP_{mpp})	-0,341 % / °C
Akım sıcaklık katsayısı (TI_{sc})	+0,045 % / °C
Gerilim sıcaklık katsayısı (TV_{oc})	-0,269 % / °C



Şekil 8. Farklı ışınım değerlerinde panel performansı



Şekil 9. Yıllara göre panelin garanti-güç bilgileri



Şekil 10. Panel genel çizimi

3.2.4 İnverter Özellikleri

Santralimizde 114 adet Huawei 100 KTL-M1 model inverter kullanılmıştır.

Tablo 6. İnverter özellikleri

Model	**Huawei 100 KTL-M1**
İnverter ölçüleri	1.035x700x365 mm
İnverter ağırlığı	90 kg
Çalışma sıcaklığı	-25 ℃ ~ +60 ℃
Koruma	IP66
	DC Giriş
Maksimum giriş gerilimi (V_{invmax})	1.100 V
Başlangıç gerilimi (V_{start})	200 V
MPPT çalışma gerilim aralığı	200 V ~ 1000 V
Minimum sistem gerilimi (V_{min})	200 V
Maksimum sistem gerilimi (V_{max})	1.000 V
Nominal giriş gerilimi	720V 480Vac ~ 600V 400Vac ~570V 380Vac
MPPT giriş gücü	15.000 W
MPPT başına maksimum akım	26 A
MPPT başına maksimum kısa devre akım	40 A
MPTT sayısı	10
MPPT başına giriş sayısı	2
	AC Çıkış
Nominal AC aktif güç	100.000 W
Maksimum AC görünür güç	110.000 VA
Maksimum AC aktif güç (cosφ=1)	110.000 W
Nominal çıkış gerilimi	400 V
Güç faktörü	0,98
Nominal frekans	50/60 Hz

Seçilen inverterlerde ayrıca aşırı akım koruması, DC ters kutup koruma, fotovoltaik arıza izleme, dalgalanmaya karşı koruma, kaçak akım izleme ünitesi mevcuttur.

3.3 Hesaplamalar

3.3.1 Panel Verim Hesabı

Bir fotovoltaik güneş pilinin nominal gücü, standart test koşullarında (STC) yani ışınım 1000 W/m2, hücre sıcaklığı 25 °C, hava kütlesi 1,5 olan koşuldan daha düşüktür. Fotovoltaik pilin kaliteli olma ölçüsü dolum faktörünün (FF), güneş pili hücresinin maksimum çıkış gücünün(P_{max}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımı oranıdır.

Dolum Faktörü (FF);

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1)$$

Maksimum güçte gerilim(V_{max}) : 38,46 V

Maksimum güçte akım(I_{max}) : 13,01 A

Açık devre gerilimi(V_{oc}) : 45,52 V

Kısa devre akımı(I_{sc}) : 13,80 A

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (2)$$

P_{max} = 38,46 * 13,01 = 500,36 W

$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{500,36}{45,52 * 13,80} = 0,796$

Dolum faktörüne bağlı panel verimi hesaplanması

$$FF = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{\eta * I_s * A_c}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{FF * V_{oc} * I_{sc}}{I_s * A_c} \quad (4)$$

I_s= Güneş ışınım gücü (Standart test koşullarındaki değer olan 1.000 W/m² alındı)

A_c= Güneş paneli yüzey alanı (2,39 m²)

Güneş paneli ebatları : 2.100 x 1.140 x 35 mm

Güneş paneli alanı : 2,39 m² (2,1 * 1,14=2,39)

$\eta = \frac{FF * V_{oc} * I_{sc}}{I_s * A_c} = \frac{0,796 * 45,52 * 13,80}{1.000 * 2,39} * 100$

ŋ= % 20,9

Giriş gücü (P_{in}) fotovoltaik hücre yüzeyine gelen güneş ışığına bağlı olan güçtür. Güneş paneli verimini hücre yüzeyine gelen giriş gücü olan P_{in} ile yapıp sağlamasını yapmak istersek;

$$P_{in} = I_s * A_c \quad (5)$$

P_{in}= 1.000 * 2,39 =2.390 W

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100 \quad (6)$$

$\eta = \frac{500,36}{2.390} * 100$ = % 20,9 bulunarak sağlaması yapılmış olur.

3.3.2 Dizi Sayısı Hesabı

Dizi hesabına başlamadan önce santral kurulacak bölgedeki en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Çatı tipi güneş santrali kuracağımız bölgedeki 1950-2022 yılları arası ölçülen en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verisinden alınmıştır.

Tablo 7. Sıcaklık ölçüm periyodu (1950~2022) [11]

İstanbul	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm periyodu (1950-2022)													
Ortalama sıcaklık (°C)	6,7	6,9	8,4	12,8	17,6	22,2	24,6	24,6	21,1	16,6	12,5	8,9	15,2
Ortalama en yüksek sıcaklık (°C)	9,5	10,2	12,2	17,3	22,3	26,9	29,5	29,6	25,8	20,6	16,0	11,7	19,3
Ortalama en düşük sıcaklık (°C)	4,1	4,2	5,4	9,2	13,6	18,0	20,4	20,7	17,6	13,7	9,8	6,4	11,9
Ortalama güneşlenme süresi (saat)	0,9	0,5	1,2	1,5	1,2	1,3	1,3	1,6	1,1	0,3	0,5	0,7	1,0
Ortalama yağışlı gün sayısı	16,61	14,17	12,72	10,22	7,65	5,54	3,54	3,65	5,59	9,61	11,39	15,74	116,4
Aylık toplam yağış miktarı ortalaması (mm)	89,7	70,5	63,1	47,5	32,6	27,9	22,5	24,6	40,5	66,7	76,0	99,3	660,9
Ölçüm periyodu (1950-2022)													
En yüksek sıcaklık (°C)	22,4	23,4	28,6	33,3	36,4	38,9	40,6	40,1	39,6	33,5	27,2	25,0	40,6
En düşük sıcaklık (°C)	-6,8	-9,0	-5,6	0,2	4,8	9,8	13,6	14,3	7,7	2,5	-2,0	-4,2	-9,0

Ölçülen en yüksek sıcaklık (T_{max}) : +40,6 °C

Ölçülen en düşük sıcaklık (T_{min}) : - 9,0°C

Kullanılan güneş paneli sıcaklık katsayıları aşağıda belirtilmiştir.

Güç sıcaklık katsayısı (TP_{mpp}) : -0,341 % / °C

Akım sıcaklık katsayısı (TI_{sc}) : +0,045 % / °C

Gerilim sıcaklık katsayısı (TV_{oc}) : -0,269 % / °C

Maksimum giriş gerilimi (V_{invmax}) : 1.100 V

3.3.3 Dizideki Maksimum Panel Sayısı Hesabı

Her bir dizideki fotovoltaik modüllerin toplam gerilim değeri, inverterin maksimum giriş geriliminden (V_{invmax} = 1.100 V) düşük olmalıdır ki inverter hasara uğramasın. Ölçülen en düşük sıcaklık baz alınırak (T_{min} = -9°C) ve panelin açık devre gerilim değeri (V_{oc}) kullanılarak denklem çözülür.

Açık devre gerilimi(V_{oc}) : 45,52 V

T_{min} : -9 °C

T_{STC} : 25 °C

$\Delta T = T_{STC} - T_{min}$

$V_{modülTmin-9°C} = V_{oc} * (1 + (\Delta T * TV_{oc})/100)$ (7)

$V_{modülTmin-9°C}$= 45,52 * (1 + ((25-(-9)) * 0,269 /100) = 49,68 V (Bir panelde oluşabilecek gerilim)

Maksimum panel sayısı (N_{max}) bulunurken maksimum inverter giriş gerilimi, hesaplanan minimum sıcaklıktaki modül verimine oranıdır.

$$N_{max} = \frac{V_{invmax}}{V_{modülTmin-9°C}} \quad (8)$$

$N_{max} = \frac{1.100}{49,68}$ = 22,3 (Bir dizideki maksimum panel sayısı tespiti 22)

Panel ve inverterin uyum kontrolü yapılmak istenirse, dizideki maksimum panel sayısı ve panelde oluşabilecek maksimum gerilimin çarpımı maksimum inverter geriliminden (V_{invmax}= 1.100 V) büyük çıkmaması gerekir. Bu nedenle bir dizide 20 adet panel kullanılmıştır.

$N_{max} * V_{modülTmin-9°C} < V_{invmax}$ denklemini sağlaması gerekmektedir.

20 * 49,68 = 993 V < 1.100 V eşitliğini sağladığından her bir diziye 20 adet panelin bağlanması uygundur.

3.3.4 Dizideki Minimum Panel Sayısı Hesabı

Minimum panel sayısı bulunurken oluşabilecek en düşük gerilim panelin maksimum güçteki gerilimidir ve panel sıcaklığı özellikle yazın yüksek olacağı düşünülerek 70 °C alınarak hesaplama yapılmıştır.

V_{mpp}= 38,46 V (paneldeki maksimum güçte gerilim)

V_{min}= 200 V (inverterde minimum sistem gerilim)

$V_{modülT70°C} = V_{mpp} * (1 + (\Delta T * TV_{oc})/100)$ (9)

$V_{modülT70°C}$= 38,46 * (1 + ((25-70) * 0,269 /100) = 33,80 V

$$N_{min} = \frac{V_{invmin}}{V_{modülT70°C}} \quad (10)$$

$N_{min} = \frac{200}{33,80}$ = 5,91 (Bir dizideki minimum panel sayısı 6 bulunmuştur)

Panel ve inverterin uyum kontrolü yapılmak istenirse, dizideki minimum panel sayısı ve panelde oluşabilecek minimum gerilimin çarpımı minimum inverter geriliminden (V_{invmin}= 200 V) düşük olmamalıdır.

$N_{min} * V_{modülT70°C} > V_{invmin}$ denklemini sağlamalıdır.

20 * 33,80 = 676 V > 200 V eşitliğini sağlamaktadır.

3.3.5 Panel Sayısı Hesabı

Panel sayısı hesaplanırken toplam DC gücün, seçilen panel gücüne oranı panel sayısını verir.

$$\text{Panel sayısı} = \frac{\text{İstenilen DC güç}}{\text{Seçilen güneş paneli gücü}} \quad (11)$$

Toplam DC kurulu güç: 13.228,5 kW = 13.228.500 W

Seçilen güneş paneli gücü : P_{max}= 500 W

Panel sayısı = $\frac{13.228.500}{500}$ = 26.457 adet panel sistemde kullanılmıştır.

Her bir çatıya yerleştirilen güneş panelleri sayısı aynı yöntem kullanılarak hesaplanmıştır.

Çatı 1 panel sayısı = $\frac{1.638.500}{500}$ = 3.277 adet panel sistemde kullanılmıştır.

Çatı 2 panel sayısı = $\frac{1.120.000}{500}$ = 2.240 adet panel sistemde kullanılmıştır.

Çatı 3 panel sayısı = $\frac{710.000}{500}$ = 1.420 adet panel sistemde kullanılmıştır.

Toplam 11 adet çatı için kurulacak güneş enerji sistemindeki kullanılacak panel sayısı aynı formülle hesaplanmıştır.

3.3.6 İnverter Sayısı Hesabı

İnverter sayısı hesaplanırken toplam AC gücün, seçilen inverterin nominal gücüne oranı inverter sayısını verir.

$$\text{İnverter sayısı} = \frac{\text{İstenilen AC güç}}{\text{Seçilen inverter nominal gücü}} \quad (12)$$

Toplam AC kurulu güç: 11.425 kW = 11.425.000 W

Seçilen inverter nominal gücü : P_{invnom}= 100 kW = 100.000 W

Panel sayısı = $\frac{11.450.000}{100.000}$ = 114 adet inverter sistemde kullanılmıştır.

Ayrı ayrı her bir çatıya kurulan sistemdeki inverter sayıları aşağıda hesaplanmıştır.

Çatı 1 inverter sayısı = $\frac{1.500.000}{100.000}$ = 15 adet inverter sistemde kullanılmıştır.

Çatı 2 inverter sayısı = $\frac{1.000.000}{100.000}$ = 10 adet inverter sistemde kullanılmıştır.

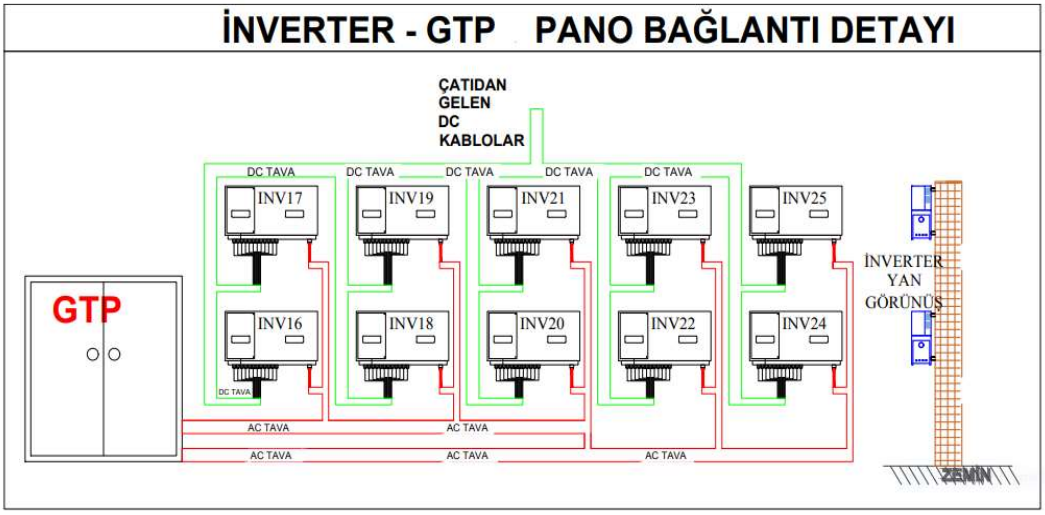
Çatı 3 inverter sayısı = $\frac{600.000}{100.000}$ = 6 adet inverter sistemde kullanılmıştır.

Toplam 11 adet çatı için kullanılacak inverter sayısı aynı formülle hesaplanmış ve aşağıdaki tabloda panel ve inverter sayıları mevcut güçler dâhil topluca gösterilmiştir.

Tablo 8. Panel ve inverter sayıları

Çatı No	Çatı Alanı (m2)	Güneş Toplama Panosu (GTP) No	DC Güç (kWp)	AC Güç (kWe)	Panel Sayısı (Adet)	İnverter Sayısı (Adet)
1	19.834	GTP 1	1.638,50	1.500	3.277	15
2	12.300	GTP 2	1.120	1.000	2.240	10
3	8.810	GTP 3	710	600	1.420	6
4	13.450	GTP 4	1.368	1.200	2.736	12
5	10.953	GTP 5	1.212	1.000	2.424	10
6	20.790	GTP 6	2.723	2.300	5.446	23
7	8.168	GTP 7	789	700	1.578	7
8	3.000	GTP 8	340	300	680	3
9	14.655	GTP 9	1.834	1.600	3.668	16
10	7.000	GTP 10	727	600	1.454	6
11	6.100	GTP 11	767	625	1.534	6
Toplam	**125.060**		**13.228,50**	**11.425**	**26.457**	**114**

İnverter ve Güneş Toplama Panosu (GTP) bağlantı detayı aşağıdaki şekilde belirtilmiştir. Çatıda kurulumu yapılmış panellerden gelen DC kablolar inverterlere bağlantısı yapılır. İnverterden çıkan AC kablolar ise GTP panosuna bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 11. İnverter ile Güneş Toplama Panosu (GTP) bağlantı detayı

3.3.7 Alçak Gerilim (AG) Bara Hesabı

Bara, santrallerde üretilen elektrik enerjisinin toplanıp cihazlara iletilmesini sağlar. İnverterde AC toplama panosu ve bu panoların toplandığı ana panoda fazların toplanması için bakır baralar kullanılmıştır. Panolarda bara seçimi yapılırken kullanılan pano güç akımının belirli emniyet katsayısı (% 10) ile çarpılarak bara seçimi yapılır.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * 400} \quad (13)$$

I= Bara akımı (A)

P= Pano AC gücü (kW_e)

İşletmede toplamda 11 adet çatıya kurulacak GES de toplam 11 adet güneş toplama panosu (GTP) kurulacaktır. İnverterden gelen AC kablolar bu kurulacak olan GTP panolara bağlanacak ve bu panolardan da AC kablolar vasıtası ile işletme ana panolarına bağlantı yapılacaktır. Kurulacak GTP panoları için bara akımı seçimi aşağıda açıklanmıştır.

<u>GTP Pano 1 gücü= 1.500 kW_e</u>

$I = \frac{P}{\sqrt{3} * 400} = \frac{1.500.000}{\sqrt{3} * 400}$ = 2.165 A (İnverter çıkışından 2.165 A akım geçmektedir)

Güvenlik katsayısı (% 10 koruma katsayısı eklendi) kullanılarak yapılan hesapta çıkan akım sonucu aşağıda hesaplanmıştır.

2.165 * 1,1 = 2.381,6 A ≈ 2.382 A

2.382 A akım geçen bölgeye seçilen bara akımı (2.382 A < 2.700 A) eşitliğini sağladığı için bara akımı 2.700 A seçilmiştir.

<u>GTP Pano 2 gücü= 1.000 kW_e</u>

$I = \frac{P}{\sqrt{3} * 400} = \frac{1.000.000}{\sqrt{3} * 400}$ = 1.443 A (İnverter çıkışından 1.443 A akım geçmektedir)

1.443 * 1,1 = 1.587,7 A ≈ 1.588 A

1.588 A akım geçen bölgeye seçilen bara akımı (1.588 A < 1.700 A) eşitliğini sağladığı için bara akımı 1.700 A seçilmiştir.

$I = \frac{P}{\sqrt{3} * 400} = \frac{600.000}{\sqrt{3} * 400}$ = 866,02 A (İnverter çıkışından 866 A akım geçmektedir)

866 * 1,1 = 952,6 A ≈ 953 A

953 A akım geçen bölgeye seçilen bara akımı (953 A < 1.100 A) eşitliğini sağladığı için bara akımı 1.100 A seçilmiştir.

Santraldeki kurulması planlanan 11 adet GTP panoları için seçilen bara akımı yukarıdaki formüle göre yapılmış ve aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Seçilen bara akımı, termik şalterin akımından yüksek seçilir. Bunun sebebi baranın oluşabilecek maksimum akımı taşıması ve ısınmaması içindir. Çünkü ısınan kablo baranın akım taşıma kapasitesi düşürür.

Tablo 9. Bara seçim hesabı

Pano No	Güç (kWe)	Akım (A)	Güvenlik katsayısı uygulanmış hesap	Seçilen Bara akımı(A)	Seçilen Bara (mm)
GTP 1	1.500	2.165	2.381,60	2.700	2x100x10
GTP 2	1.000	1.443	1.587,70	1.700	100x10
GTP 3	600	866	952,6	1.100	60x10
GTP 4	1.200	1.732	1.905,30	2.300	2x80x10
GTP 5	1.000	1.443	1.587,70	1.700	100x10
GTP 6	2.300	3.320	3.651,70	4.000	3x100x10
GTP 7	700	1.010	1.111,40	1.400	80x10
GTP 8	300	433	476,3	630	50x5
GTP 9	1.600	2.309	2.540,30	2.700	2x100x10
GTP 10	600	866	952,6	1.100	60x10
GTP 11	625	902	992,3	1.100	60x10

3.3.8 İnverter için Termik Şalter Hesabı

İnverter nominal AC aktif güç: 100 kW = 100.000 W

$I = \frac{P}{\sqrt{3}*400} = \frac{100.000}{\sqrt{3}*400} = 144{,}3$ A

144,3 * 1,1 = 158,7 A ≈ 159 A (Güvenlik katsayısı kullanılarak yapılan hesap)

Seçilen inverter sistem akımı 159 A < 200 A eşitliğini sağladığı için seçilen inverter termik manyetik şalter akımı 200 A seçilmiştir.

3.3.9 Güneş Toplama Panoları (GTP) için Şalter Hesabı

Santralde toplamda 11 adet GTP panosu bulunmaktadır. Bu panolar için termik manyetik şalter akımı hesabı aşağıda hesaplanmıştır.

GTP Pano 1 gücü= 1.500 kW_e

$I = \frac{P}{\sqrt{3}*400} = \frac{1.500.000}{\sqrt{3}*400} = 2.165$ A (İnverter çıkışından geçen akım)

2.165 * 1,1 = 2.381,6 A ≈ 2.382 A (Güvenlik katsayısı kullanılarak yapılan hesap)

Termik manyetik şalter 2.500 A seçilmiştir. (2.382 < 2.500 eşitliği sağlanmaktadır)

Her bir Güneş Toplama Panoları (GTP) için hesaplamalar yukarıdaki formüle göre yapılmış olup aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 10. GTP panoları için termik manyetik şalter hesabı

Pano No	Güç (kWe)	Akım (A)	Güvenlik katsayısı uygulanmış hesap	Seçilen termik şalter(A)
GTP 1	1.500	2.165	2.381,60	2.500
GTP 2	1.000	1.443	1.587,70	1.600
GTP 3	600	866	952,6	1.000
GTP 4	1.200	1.732	1.905,30	2.000
GTP 5	1.000	1.443	1.587,70	1.600
GTP 6	2.300	3.320	3.651,70	4.000
GTP 7	700	1.010	1.111,40	1.250
GTP 8	300	433	476,3	630
GTP 9	1.600	2.309	2.540,30	2.500
GTP 10	600	866	952,6	1.000
GTP 11	625	902	992,3	1.000

3.3.10 DC Kablo Hesabı

Panellerden inverterlere bağlantı DC kablolar vasıtası ile yapılmaktadır.

Tablo 11. Panel ~ İnverter arası kablolama hesap tablosu

Dize kablo uzunluğu (L=m+)	Dize kablo uzunluğu (L=m-)	Dize kablo kesiti (S=mm²)	Panel kablo uzunluğu (L=m+)	Panel kablo uzunluğu (L=m-)	Panel kablo kesiti (S=mm²)	Bakır iletkenliği (K=m/Ω.mm²)	Güç (P_{dz})=W	Maksimum güçte gerilim(V_{dz})=V	Maksimum güçte akım(I_{dz}) =A
92	112	6	28	24	4	56	10.000	769,2	13,01

Paneller arası 4 mm² kablo için gerilim düşüm hesabı yapılırken aşağıdaki denklemleri kullanılmıştır.

V_{dz} = Dizi sayısı (N) * Maksimum güçte gerilim(V_{mpp}) (14)

V_{dz} = 20 * 38,46 = 769,2 V

$V_{modülT°C}$=N * V_{mpp} * (1 + (ΔT * TV_{oc})/100) (15)

$V_{modülT°C}$= 20 * 38,46 * (1 + ((25-70) * 0,269 /100) = 676,08 V

P_{dz} = Dizi sayısı (N) * Panel maksimum güç (P_{max}) (16)

P_{dz} = 20 * 500 = 10.000 W

Kablo kesiti (S) = 4 mm²

Panel kablo uzunluğu (L) = 28 m

Bakır iletkenliği (K) = 56 m/Ω.mm²

I_{mpp} = 13,02 A

V_{mpp} = 38,46 V

$$\%e_{DC} = \frac{L * I_{mpp}}{S * V_{modülT°C} * K} * 100 \quad (17)$$

$$\%e_{DC} = \frac{28 * 13,02}{4 * 676,08 * 56} * 100 = \% 0,24$$ %0,24 < % 2 olduğu için uygundur.

Paneller arası 4 mm² kablo için güç kaybı hesabı yapılırken aşağıdaki denklemleri kullanılmıştır.

$$P_k = \frac{L * I_{mpp}^2}{S*K} * 100 \quad (18)$$

$$P_k = \frac{28 * 13{,}02^2}{4 * 56} * 100 = 2.119 \text{ W}$$

$$\%\Delta P = \frac{P_k}{P_{dz}} \quad (19)$$

$$\%\Delta P = \frac{P_k}{P_{dz}} = \frac{2.119}{10.000} = \% 0{,}21$$ % 0,21 < % 2 olduğu için uygundur.

İnverter ve paneller arası 6 mm² kablo için gerilim düşüm hesabı yapılırken aşağıdaki denklemleri kullanılmıştır.

Kablo kesiti (S) = 6 mm²

Panel kablo uzunluğu (L) = 352 m

Bakır iletkenliği (K) = 56 m/Ω.mm²

I_{mpp} = 13,02 A

$$\%e_{DC} = \frac{L * I_{mpp}}{S * V_{modülT°C} * K} * 100 = \frac{352 * 13{,}02}{6 * 676{,}08 * 56} * 100 = \% 2{,}01$$ % 2,01 > % 2 olduğu için 6 mm² kablo uygun değildir.

Bu nedenle kablo kesiti 10 mm² seçilmiştir ve hesaplama yeniden yapılırsa;

$$\%e_{DC} = \frac{352 * 13{,}02}{10 * 676{,}08 * 56} * 100 = \% 1{,}21$$ çıkar % 1,21 < % 2 olduğu için uygundur.

İnverter ve paneller arası 10 mm² kablo için güç kaybı hesabı yapılırken aşağıdaki denklemleri kullanılmıştır.

$$P_k = \frac{L * I_{mpp}^2}{S * K} * 100 = \frac{352 * 13{,}02^2}{10 * 56} * 100 = 10.655{,}56 \text{ W}$$

$$\%\Delta P = \frac{P_k}{P_{dz}} = \frac{10.655{,}56}{10.000} = \% 1{,}06$$ % 1,06 < % 2 olduğu için uygundur.

Bir AG (Alçak Gerilim) hattındaki toplam DC gerilim düşümü %2 den küçük olmalıdır. Denklemde penel ve inverter tarafındaki gerilim düşüm toplamları % 2 den küçük olup olmadığı aşağıdaki eşitleme sağlaması yapılarak bulunur.

Toplam $\%e_{DC} = \%e_{DC\ 4\ mm^2} + \%e_{DC\ 6\ mm^2}$

Toplam $\%e_{DC} = 0{,}24 + 1{,}21 = 1{,}45$ (% 1,45 < % 2 olduğundan uygundur)

3.3.11 GTP Panoları ve Ana Dağıtım Panoları (ADP) Arası AC Kablo Hesabı

İşletmede mevcut bulunan ve işletmeyi besleyen toplam 11 adet Ana Dağıtım Panosuna (ADP), 11 adet Güneş Toplama Panosu (GTP) bağlantısı yapılacaktır. Bu bağlantıda AC kablo kullanılmaktadır.

Ana dağıtım panosu 1 ve GTP 1 nolu pano arası AC hesabı

Akım taşıma hesabı

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V_ç * \cos\Phi} \quad (20)$$

P_1 = 1500 kW = 1.500.000 W

$V_ç$= 400 V

Cosφ =1

$$I_1 = \frac{1.500.000}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 2.165{,}06 \text{ A}$$

Kablo direnci hesabı

R : Kablo direnci (Ω)

ρ = 1/56 : 0,0178 m/Ω.mm²

Kablo boyu L : 10 m

Kablo cinsi : NYY

Kablo kesiti : Devre S. x Damar S. x Kesit

Kablo kesiti : 8 x 4 x (1 x 240) mm²

S = Devre S. * Kesit

S = 8 * 240 = 1.920 mm²

$$R = \frac{\rho * L}{S} \quad (21)$$

$$R = \frac{0,0178 * 10}{1.920} = 0,000092\ \Omega$$

Kayıp güç hesabı

P_k : Kayıp güç (W)

$$P_k = 3 * I_1^2 * R \quad (22)$$

$P_k = 3 * (2.165,06)^2 * 0,000092 = 1.293,74$ W

$$\%P_k = \frac{P_k}{P_1} * 100 \quad (23)$$

$$\%P_k = \frac{1.293,74}{1.500.000} * 100 = \%\ 0,086$$

Gerilim düşüm hesabı

V_k : Kayıp gerilim (V)

$$V_k = \sqrt{3} * I * R \quad (24)$$

$V_k = \sqrt{3} * 2.165,06 * 0,00009 = 0,34$ V

$$\%V_k = \frac{V_k}{V_ç} * 100 \quad (25)$$

$$\%V_k = \frac{0,34}{400} * 100 = \%\ 0,085$$

Kablonun akım taşıma kontrol hesabı

240 mm² kesitli NYY kablonun değerleri Öznur Kablo kataloğundan seçilmiştir.

Dış ortam düzeltme faktörü (c_t) : 0,94

Kablo grupları için düzeltme faktörü (c_g) : 0,72

Akım taşıma kapasitesi (I_k) : 480 A

$$I_d = \text{Devre sayısı} * I_k * c_t * c_g \quad (26)$$

$I_d = 8 * 480 * 0,94 * 0,72 = 2.598,9$ A

$I_1 =$ 2.165,06 A bulunmuştur, I_1(2.165,06 A) < I_d (2.598,9 A) olduğu için seçilen termik manyetik şalter 4 x 2.500 A seçilmiş olup uygundur. Bunun sebebi Trifaze elektrik şebekesi 3 Nötr ve topraklamadan oluşur. 8x1x240 mm² kablo 2.598 A akım taşır. Şalter 4 kutuplu olacak şekilde seçilir. (L1, L2, L3 ve Nötr)

Toplam 11 adet ADP (Ana Dağıtım Panosu) için, GTP panosu ve ana dağıtım panosu arası AC kablo hesaplamaları yapılmış olup aşağıdaki tabloda özet halinde gösterilmiştir.

Tablo 12. GTP panosu ve ADP panosu AC kablo hesapları genel tablosu

Ana Pano No	AC Güç (kWe)	İnv. Çıkış Gerilimi ($V_ç$)	İnv. Çıkış Akımı ($I_ç$)	İnv. Çıkış Kablo Tipi	İnv. Kablo Kesiti(S)	İnv. Kablo Uzunluğu(L)	Toplam Kablo Direnci (Ω)	Toplam Güç Kaybı(W)	Toplam Gerilim Düşümü (V)
			$I=\frac{P}{\sqrt{3}*V_ç*\cos\Phi}$		S = Devre S. * Kesit		$R=\frac{\rho*L}{S}$	$P_k = 3 * I_1^2 * R$	$V_k = \sqrt{3} * I * R$
1	1.500	400	2.165,06	8x4x(1x240) NYY	1.920	10	0,0001	2.070,12	0,55
2	1.000	400	1.443,38	5x4x(1x240) NYY	1.200	10	0,0002	1.472,08	0,59
3	600	400	866,03	2x4x(1x240) N2XH	480	10	0,0006	1.324,88	0,88
4	1.200	400	1.732,05	6x4x(1x240) NYY	1.440	10	0,0002	1.766,50	0,59
5	1.000	400	1.443,38	4x4x(1x240) N2XH	960	10	0,0003	1.840,10	0,74
6	2.300	400	3.319,76	12x4x(1x240) NYY	2.880	10	0,0001	3.244,72	0,56
7	700	400	1.010,36	4x4x(1x240) NYY	960	10	0,0003	901,65	0,52
8	300	400	433,01	2x4x(1x150) NYY	300	10	0,0009	529,95	0,71
9	1.600	400	2.309,40	8x4x(1x240) NYY	1.920	10	0,0001	2.355,33	0,59
10	600	400	866,03	3x4x(1x240) NYY	720	10	0,0004	883,25	0,59
11	625	400	902,11	3x4x(1x240) NYY	720	10	0,0004	958,39	0,61

3.3.12 Güneş Toplama Panosu(GTP) ve İnverter Arası AC Kablo Hesabı

Akım taşıma hesabı

P_1 = 100 kW = 100.000 W

$V_ç$= 400 V

Cosφ =1

$I_{inv} = \frac{P}{\sqrt{3}*V_ç*\cos\Phi} = \frac{100.000}{\sqrt{3}*400*1}$ = 144,34 A

Kablo direnci hesabı

ρ = 1/56 : 0,0178 m/Ω.mm²

Kablo boyu L : 40 m

Kablo cinsi : NYY

Kablo kesiti : Devre S. x Damar S. x Kesit

Kablo kesiti : 1 x 4 x (1 x 95) mm²

S = Devre S. * Kesit

$S = 1 * 95 = 95\ mm^2$

$R = \frac{\rho * L}{S} = \frac{0,0178 * 40}{95} = 0,0075\ \Omega$

Kayıp güç hesabı

$P_k = 3 * I_1^2 * R$

$P_k = 3 * (144,34)^2 * 0,0075 = 468,76\ W$

$\%P_k = \frac{P_k}{P_1} * 100 = \frac{468,76}{100.000} * 100 = \%\ 0,47$

Gerilim düşüm hesabı

$V_k = \sqrt{3} * I * R = \sqrt{3} * 144,34 * 0,0075 = 1,87\ V$

$\%V_k = \frac{V_k}{V_ç} * 100 = \frac{1,87}{400} * 100 = \%\ 0,46$

Kablonun akım taşıma kontrol hesabı

95 mm^2 kesitli NYY kablonun değerleri Öznur Kablo kataloğundan seçilmiştir.

Dış ortam düzeltme faktörü (c_t) : 0,94

Kablo grupları için düzeltme faktörü (c_g) : 0,77

Akım taşıma kapasitesi (I_k) : 260 A

I_d = Devre sayısı * I_k * c_t * c_g = 1 * 260 * 0,94 * 0,77 = 188,18 A

I_{inv} = 144,3 A bulunmuştu, I_{inv}(144,3 A) < I_d (188,18 A) olduğu için seçilen termik manyetik şalter 200 A seçilmiş olup uygundur.

Yapılan kontrollerde şebekeye verilen anlık güçler ölçülmüş olup tabloda gösterilmiştir. Yapılan ölçümlerde 1 saat 7 dakika süre içerisinde güneş panellerinden üretilen güç değeri 4.338 kW olmaktadır.

Tablo 13. Güneş enerjisi sistemi kontrol formu

GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMİ KONTROL FORMU			**Tarih: 15.11.2023**
Bölge	**Toplam İnverter Sayısı**	**Kontrol Saati**	**Şebekeye Verilen Anlık Güç (kW)**
GTP 1	15	13:53	699,7
GTP 2	10	13:43	466
GTP 3	6	14:10	207
GTP 4	12	14:03	591,6
GTP 5	10	14:22	376,5
GTP 6	23	14:27	736
GTP 7	7	14:43	219,1
GTP 8	3	14:39	98,5
GTP 9	16	14:50	440
GTP 10	6	14:34	249,4
GTP 11	6	14:36	254,3
	114	**1 Saat 7dk**	**4.338,1**

4. SONUÇLAR

Bu makalemizde İstanbul Büyükçekmece'deki işletmeye kurulan çatı tipi güneş santralinin güneş panellerinden elektrik enerjisi elde edilmesi, yapının çalışma prensibi ve hesaplamaları açıklanmıştır. GES santralinin AC gücü 11.425 MW olup, mevcut işletmedeki sistemde 2 adet 50 MW lık (1 tanesi yedek) kurulu trafo gücü ile 154 kV lık TEİAŞ iletim hatlarından beslenmektedir. GES santralinden üretilen elektrik enerjisi ay sonunda toplam tüketilen elektrik enerjisinden düşülerek mahsuplaşma yolu ile hesaplama yapılır.

Güneş santrali 11 adet çatı üzerine kurulumu yapılmış olup santralde 26.457 adet Schmid Pekintaş SPE 500 modelli 500 W gücünde monokristal yapılı panel, ayrıca Huawei 100 KTL-M1 modelli 100 kV lık 114 adet inverter tercih edilmiştir.

SEMBOLLER

V_{oc}	*Açık devre gerilimi (V)*
TI_{sc}	*Akım sıcaklık katsayısı (% / °C)*
K	*Bakır iletkenliği (m/Ω.mm²)*
I	*Bara akımı (A)*
V_{start}	*Başlangıç gerilimi (V)*
FF	*Dolum faktörü*
TV_{oc}	*Gerilim sıcaklık katsayısı (% / °C)*
TP_{mpp}	*Güç sıcaklık katsayısı (% / °C)*
A_c	*Güneş paneli yüzey alanı (m²)*
S	*Kablo kesiti (mm²)*
R	*Kablo direnci (Ω)*
I_{sc}	*Kısa devre akımı (A)*
P_{max}	*Maksimum güç (Wp)*
V_{mpp}	*Maksimum güçte gerilim (V)*
I_{mpp}	*Maksimum güçte akım (A)*
V_{sys}	*Maksimum sistem gerilimi (V)*
V_{invmax}	*Maksimum giriş gerilimi (V)*
V_{max}	*Maksimum sistem gerilimi (V)*
N_{max}	*Maksimum panel sayısı*
N_{min}	*Minimum panel sayısı*
V_{min}	*Minimum sistem gerilimi (V)*
T_{max}	*Ölçülen en yüksek sıcaklık (°C)*
T_{min}	*Ölçülen en düşük sıcaklık (°C)*
N	*Panel sayısı*
P	*Pano AC gücü (kW_e)*
L	*Panel kablo uzunluğu (m)*
P_k	*Toplam güç kaybı (W)*
V_k	*Toplam gerilim kaybı (V)*
η	*Verim*

KISALTMALAR

ADP	*Ana Dağıtım Panosu*
AG	*Alçak Gerilim*
ETKB	*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*
EÜAŞ	*Elektrik Üretim Anonim Şirketi*
GES	*Güneş Enerji Santrali*

GTP	*Güneş Toplama Panosu*
IEA	*International Energy Agency- Uluslararası Enerji Ajansı*
IRENA	*International Renewable Energy Agency- Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı*
PV	*Fotovoltaik*
TEİAŞ	*Türkiye Elektrik İletişim Anonim Şirketi*

KAYNAKLAR

[1] Öztürk, H.H., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları" , Birsen Yayınevi, İstanbul, 2021, Sayfa: 2

[2]https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_-RE_Capacity_Highlights_2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4&hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED "International Renewable Energy Agency" 20.03.2023

[3] https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik 21.07.2023

[4] Öztürk, H.H., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları" , Birsen Yayınevi, İstanbul, 2021, Sayfa: 28

[5]https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=d2949151ee6a4625b65c82881403c2a7 "International Renewable Energy Agency" (2023) Sayfa: 21- 22

[6] https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri

[7] Kaya, D. & Öztürk, H.H. "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Fotovoltaik Teknoloji", Umuttepe Yayınları, İzmit, 2019, Sayfa: 294-295

[8] https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC007109G0202& sayfa: 16 "ABB Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants"

[9] Kaya, D. & Öztürk, H.H. "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Fotovoltaik Teknoloji", Umuttepe Yayınları, İzmit, 2019, Sayfa: 296-297

[10] https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC007109G0202& sayfa: 15 "ABB Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants"

[11]https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=%C4%B0STANBUL/FLORYA "T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı"

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yatak boşluğu, Yağ Sınıfı ve Sıcaklığının Motor Kaymalı Yataklarında Minimum Yağ Film Kalınlığı (MYFK) ve Sürtünme Güç Kaybı Üzerine Etkisinin Sayısal Simülasyonu

Ramazan Aydın[a], Lütfullah Kuddusi[b]*

[a,b]İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** raydin@itu.edu.tr

ÖZET

İçten yanmalı motor krank ve ana yatakları gibi iki yüzey arasında doğrudan metal-metal temasını önlemek için izin verilebilecek en küçük işletme mesafesi, minimum yağ filmi kalınlığı (MYFK) ile ifade edilir. Bu işletme mesafesi, hareketli parçalarda sürtünmeyi, aşınmayı azaltmak ve sistem ömrünü uzatmak için gereklidir. Minimum yağ filmi kalınlığı, kullanılan yağlayıcı türü, çalışma koşulları, sistem üzerine gelen yükler ve hareketli parçaların hızı gibi birçok faktörlere bağlıdır. Bu çalışma, içten yanmalı motorlardaki ana yatakların optimal çalışma koşullarını belirlemeyi amaçlamaktadır; bunu da farklı koşullar altında (yatak boşluğu, motor hızı, yağ sınıfı ve giriş sıcaklığı) sürtünme güç kaybı ve MOFT'u analiz ederek gerçekleştirmektedir. GT-Suite yazılımı kullanılarak yağlama model analizi yapılmış ve hidrojenle çalışan tek silindirli bir araştırma motorundan elde edilen deneysel veriler, yatak yüklerini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, yatak boşluğunun 0.005µm'den 0.0325µm'e (%65 artış) artırılmasının MOFT'u önemli ölçüde artırdığını ve tüm yağ tipleri için sürtünme güç kaybını azalttığını göstermektedir; özellikle, 15W40 yağıyla belirgin bir şekilde MOFT'ta %67 artış ve güç kaybında %78'lik bir azalma gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, uygun bir yağlayıcı seçimi ve işletme koşullarının optimize edilmesiyle sürtünme güç kaybını azaltma ve uygulanabilir bir MOFT elde etme konusunda önemli bir fırsatı göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: İçten Yanmalı Motor, Kaymalı Yatak, MYFK, Sürtünme, Yağlama

Numerical Simulation of the Impact of Bearing Clearance, Oil Grade and Temperature on Minimum Oil Film Thickness and Friction Power Loss in Engine Bearings

ABSTRACT

The Minimum Oil Film Thickness (MOFT) represents the minimum allowable distance between surfaces, like crank and main bearings in an internal combustion engine, to prevent metal-to-metal contact. Maintaining this clearance is crucial for reducing friction, wear, and extending system lifespan. MOFT varies based on factors like oil grade, operating conditions, loads and speed. This study aims to identify optimal operating conditions for main bearings in internal combustion engines by investigating friction power loss and MOFT under varying conditions (bearing clearance, engine speed, oil grade and inlet temperature). Using GT-Suite software, lubrication model analysis was conducted. Experimental data from a hydrogen-fired single-cylinder research engine were utilized to determine bearing loads. Results show that increasing bearing clearance from 0.005µm to 0.0325µm (a 65% increase) leads to a significant rise in MOFT and notable reduction in friction power loss for any oil grade. Specifically, with 15W40 oil, there's a 67% increase in MOFT and a 78% decrease in power loss. These findings highlight the potential to minimize friction power loss and achieve optimal MOFT by selecting suitable lubricants and optimizing operating conditions for main sliding bearings in an internal combustion engine.

Keywords: Internal Combustion Engine, Friction, Lubrication, MOFT, Sliding Bearing

I. INTRODUCTION

The internal combustion engine lubrication system is designed to optimize the formation of an oil film across all frictional interfaces, such as piston-cylinder, piston rings-cylinder, cam, conrod, and main bearings. This oil film plays a vital role in minimizing wear on engine components and minimizing frictional losses. Any disruption to the continuity of the oil film, resulting in boundary or mixed friction conditions, will inevitably lead to increased wear and friction losses. The effectiveness of the continuous oil film in reducing wear and friction losses can vary depending on the specific conditions under which it is formed [1]. Additionally, the lubrication system serves several other functions, including engine cooling, corrosion protection, cleaning and shock absorption.

Figure 1 below provides a simplified overview of the internal combustion engine lubrication system. The oil pump sucks oil from the oil pan and delivers it through the engine's main gallery to distribute oil under pressure, typically around 4-5 bar(gauge), to small clearances in moving parts. These parts include sliding main bearings, connecting rod bearings, camshaft bearings, and the outer surfaces of pistons. Additionally, the oil is directed for cooling purposes through piston nozzle jets located underneath the piston.

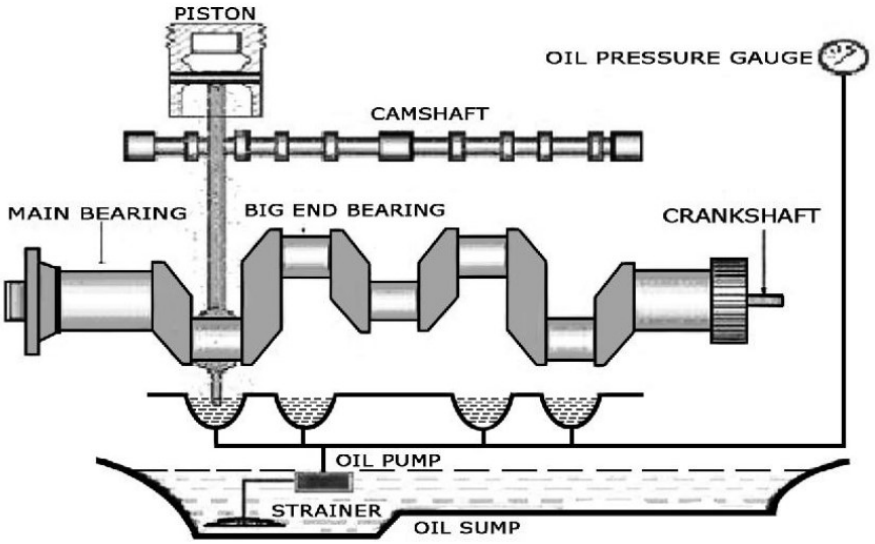


Figure 1. A basic outline of the internal combustion engine lubrication system [2]

In most cases, engine bearings primarily operate within a hydrodynamic lubrication regime. Here, pressurized oil serves to create a separation between the bearing surface and the journal surface. [3]. The stability of hydrodynamic lubrication and frictional power losses over the bearing surface in an internal combustion engine are determined by various parameters of motor oil. Among these parameters, viscosity which is highly dependent on temperature stands out as the most critical. Another significant geometric parameter of engine bearings is oil clearance, which is closely linked to oil viscosity. Generally, a larger clearance necessitates the use of more viscous oil. Engine designers have aimed to minimize frictional power losses, leading to the adoption of lower viscosity oils in modern engine designs compared to older ones. Nevertheless, low viscosity oils require low oil clearance to maintain the stability of hydrodynamic lubrication[1].

The main bearing, being a crucial friction component in diesel engines, has a direct impact on their reliability and economic efficiency through its lubrication performance. With the ongoing improvement in the strengthening coefficient of internal combustion engines, the main bearing experiences increasing impact loads, demanding elevated lubrication standards. Hence, thoroughly examining the lubrication characteristics of engine main bearings holds immense significance in enhancing their reliability and prolonging their service life[4-6].

Hydrodynamic lubrication refers to a lubrication system in which the movement of sliding surfaces generate a fluid film with sufficient pressure to avoid direct contact. This lubrication regime is determined by the presence of a thin, pressurized lubricant film between the bearing and journal surface, which is characterized by the ratio of the oil film thickness (h) to the surface roughness (Ra) [7-8].

h <Ra, boundary lubrication (Figure 2);

h =Ra, mixed lubrication

h> Ra, hydrodynamic lubrication (Figure 3).

In hydrodynamic lubrication, the oil film provides support to the journal until it reaches a critical point, which can occur due to increased load, low rotational speed, or inadequate oil viscosity. Beyond this critical point, the oil film thins to a level thinner than the surface asperities. As a result, there is a risk of damage when the asperities of the journal and bearing, which are peaks of the surface roughness, come into contact. Once the bearing reaches a stable operating temperature, the minimum film thickness within the bearing can be established [9].

For all oil grades, the maximum operating temperature should be equal or less than 120^0C and also to avoid the contact, the minimum film thickness should be [10]:

$$h=0.005+0.0004D \text{ mm} \quad (1)$$

where, D is the journal diameter in mm

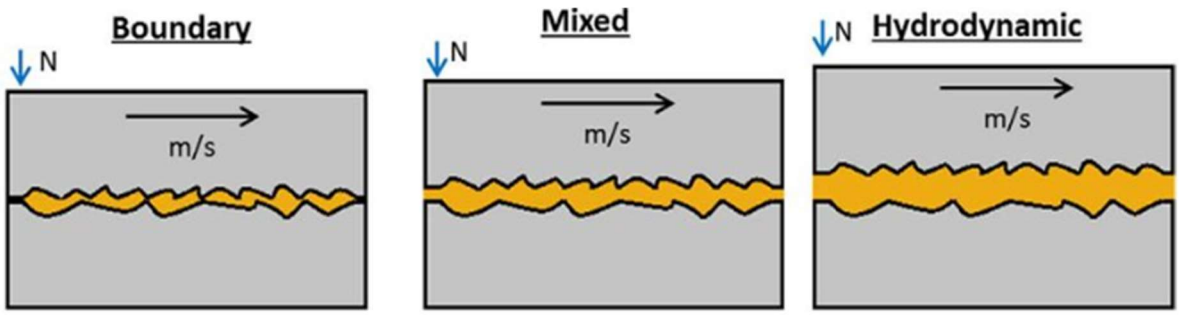


Figure 2. Lubrication regimes [11]

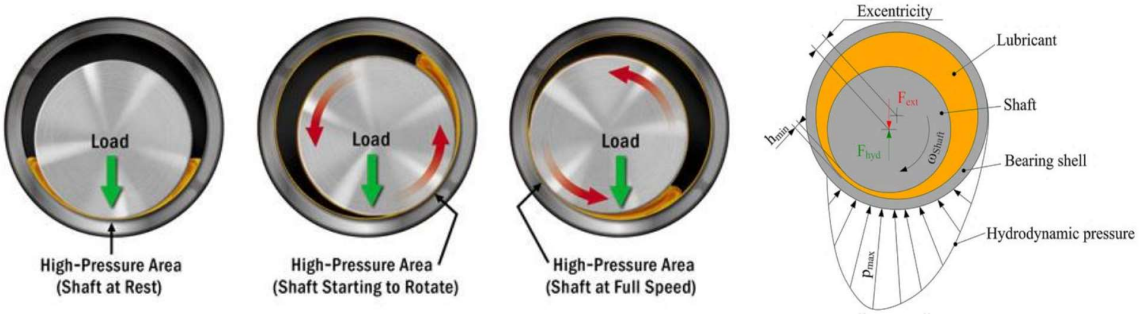


Figure 3. Hydrodynamic journal bearing and lubrication in engine crank shaft [12]

In order to comprehend the various modes of lubrication, we will analyze the correlation between film thickness, oil viscosity, load, and the speed of movement of the frictional interface. These intricate relationships are depicted in a graphical representation known as the Stribeck Curve, highlighted in purple in Figure 4. The curve represents the minimum value of friction between full fluid separation and direct asperity contact of two surfaces and plotted as a function of viscosity, load and speed variable parameters [1].

Moving towards the left in this mixed region, contact between the asperities begins. This left-hand region represents boundary lubrication, where friction primarily arises from the interaction of the asperities between the two bearing surfaces. In Figure 4, dashed lines on the left side of the graph illustrate a decrease in both the coefficient of friction and wear with the appropriate anti-wear additive [1]. Even in the presence of lubrication, contact between the surfaces can still occur. This heightened contact period is most common during start-up, shut-down, and low speeds of the machine utilizing the bearing, known as boundary or mixed lubrication conditions [13].

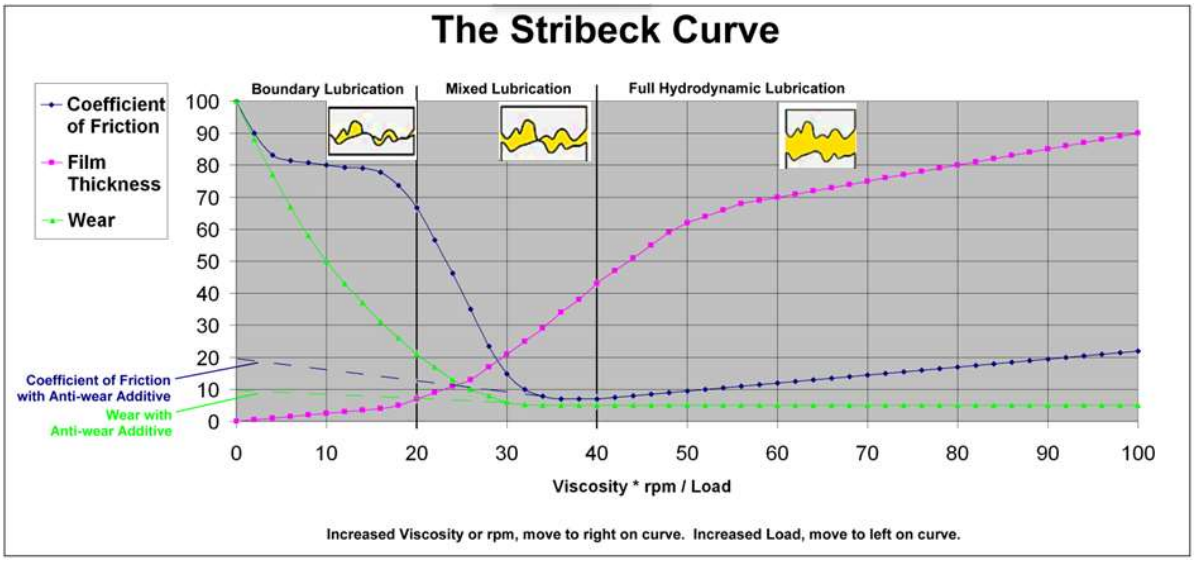


Figure 4. The Stribeck Curve (Plus Coefficient of Friction and Wear Curves) [1]

In hydrodynamic bearings, friction occurs differently from the common understanding of two solid surfaces rubbing against each other. Instead, the bearing and journal surfaces are separated by a fluid lubricant film that adheres to both surfaces. As the journal surface moves, it induces movement of the lubricant. The oil film can be visualized as consisting of multiple layers moving relative to each other. This relative motion generates shear forces between adjacent layers, which resist the rotation of the journal. Known as hydrodynamic friction, this force leads to power loss[20].

This article investigates the minimum oil film thickness and frictional power loss of the main sliding bearing in operation within a single-cylinder test engine, examining variable parameters such as oil grade, bearing clearance, oil inlet temperature, and engine speed.

II. METHODOLOGY

In this study, the bearing loads and essential operating parameters for the one-dimensional lubrication system were obtained from the single-cylinder test engine located at Tubitak RUTE. The single cylinder engine lubrication system consists of two main bearings (MB1, MB2), one conrod bearing (CRB1), a piston nozzle jet, two rocker jets, and a gear system. Figure 4 illustrates a sectional view of the single-cylinder engine, depicting the cranktrain, main bearing, conrod bearing, and piston. The 5 lt/min of oil is supplied from the system oil pump and directed to the main oil gallery. Once the oil reaches a gauge pressure of 4.5 bar in the main oil gallery, it is distributed through a full groove in the main bearing.

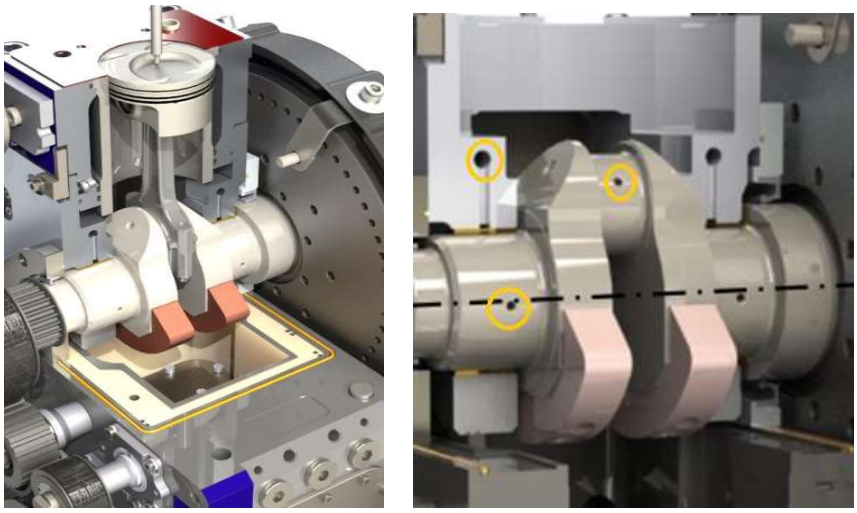


Figure 5. Single cylinder research engine crank train and main sliding bearing

The specifications of the single-cylinder test engine are outlined in Table 1 below. The main bearing features a diameter of 63mm and a width of 30mm, incorporating a full groove and a diametric clearance of 0.0325mm. The following main parameters were considered as the variables for the study during simulation.

The oil grades : 5W30, 5W40, 10W30,10W40, 15W40, 25W40, SAE30 and SAE40
Oil inlet temperatures : 0, 30, 60, 90 and 120 °C
Engine rotation speeds : 1000- 6000 RPM.
Main bearing clearances : 0.005, 0.01, 0.0325, 0.06, 0.1 mm

Table 1. Single cylinder engine lubrication system specification

Number of Cylinders		1
Cylinder Bore	mm	82
Stroke	mm	86
Idle Speed	rpm	700
Rated Speed	rpm	6000
Maximum speed	rpm	6400
Maximum Power	kW	21,1
Maximum Torque	Nm	35,8
Journal diameter	mm	62.95
BearingType	Thin wall, full groove	
Bearing Diameter	mm	63
Bearing Length	mm	30
Main Gallery Pressure	bar	4.5@90C
Oil Flow Rate	lt/min	5
Main Bearing Clearance	mm	0.0325

The main bearing loads of the single-cylinder test engine were derived from the maximum cylinder pressures recorded during experimental tests. Figure 6 illustrates the cylinder maximum pressures, while Figure 7 depicts the loads exerted on one of the main bearings (MB-1).

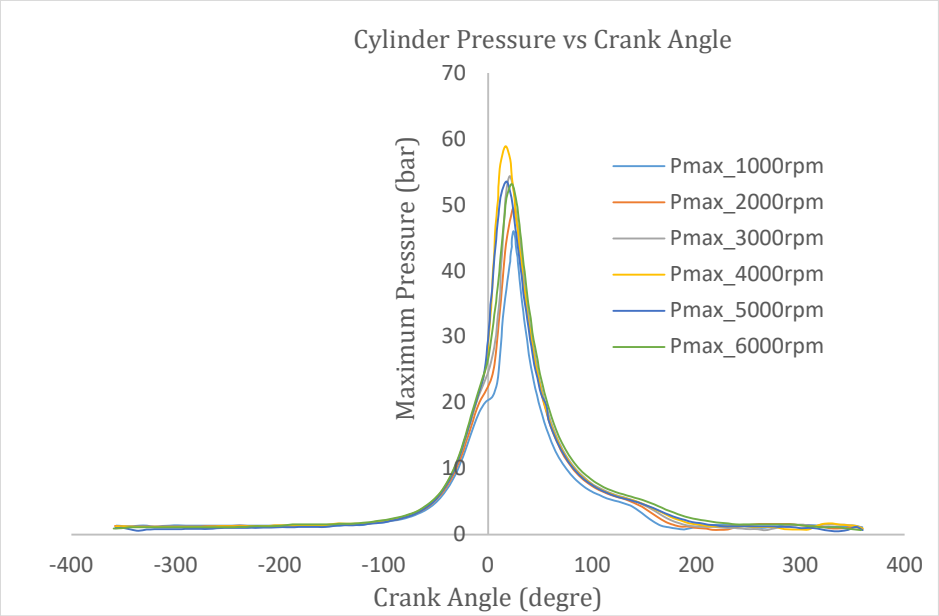


Figure 6. Single Cylinder Engine Piston pressures for 1000-6000 rpms,

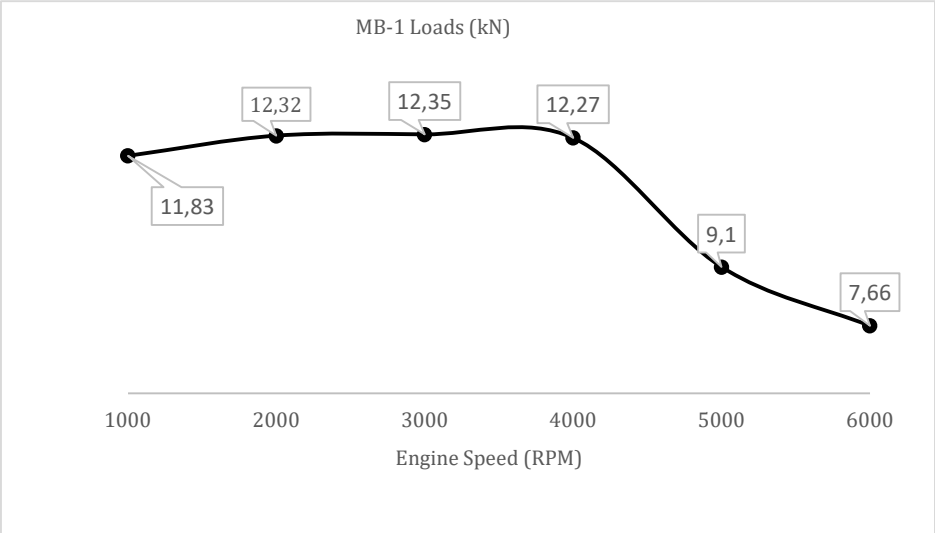


Figure7. Single Cylinder Engine main bearing loads for 1000-6000rpms

The one-dimensional lubrication system model was developed based on the lubrication system circuit of the single-cylinder research engine, with experimental data serving as input parameters for the bearing study. The circuit for the one-dimensional model is depicted in Figure 8 below. In order to calculate the friction losses in engine GT-Suite software has been used. GT-Suite is a well-known software to simulate different engine performance. Different authors use GT-Suite to predict tribology performance in ICE rubbing pairs [14-15].

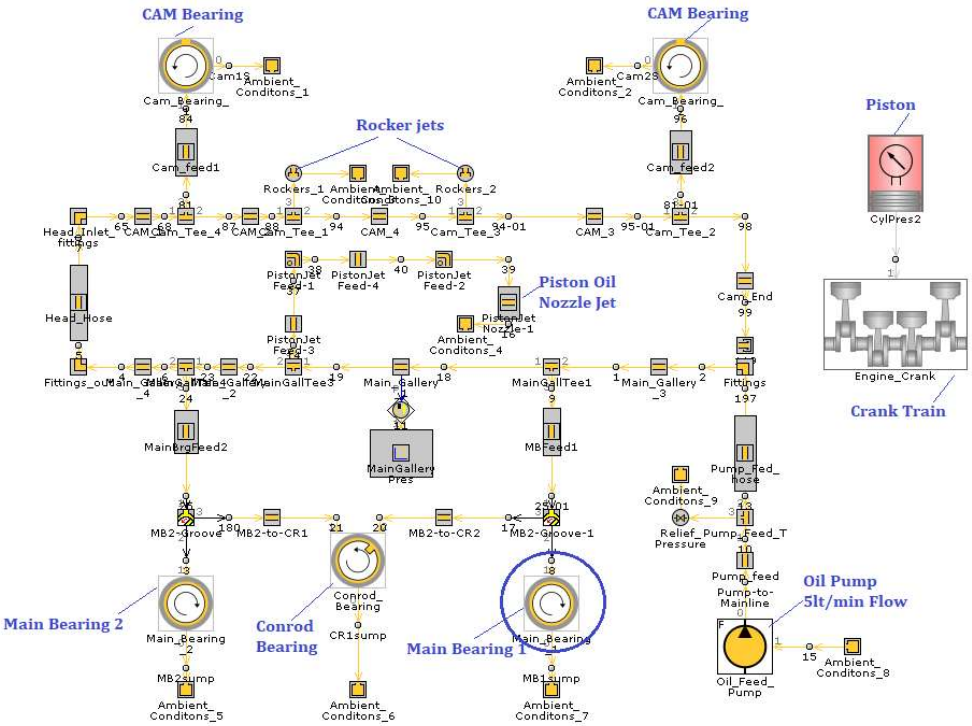


Figure 8. One dimentional lubrication system model

A. Viscosity grades of motor oils

According to the SAE viscosity grading system all motor oils are divided into two classes: mono-grade and multi-grade [5]:

Mono-grade motor oils are designated by a single number (20, 30, 40, etc.), indicating viscosity at a specific temperature. Higher numbers mean higher viscosity. Oils without "W" (SAE 20, etc.) are for high temperatures(100^0C), while those with "W" (SAE 20W, etc.) are for low temperatures(18^0C) [20].

Multi-grade motor oils, denoted by two numbers and the letter "W" (e.g., SAE 10W30), stabilize viscosity across temperatures using polymeric additives. The first number signifies cold temperature viscosity, while the second represents high temperature viscosity. These oils offer versatility for use across a wide temperature range[20].

As observed in Figure 9, the kinematic viscosity of studied oil grades exhibits significant variation within a specific temperature range. However, beyond a certain temperature threshold, typically around 90°C, the kinematic viscosity of all oil grades converges to similar values and remains relatively stable thereafter. Here, "cSt" denotes centistokes (1 cSt = 1 mm^2/s). For example for 5W30-62-10cSt, the first number (62cSt) indicates viscosity at 40°C, while the second number (10cSt) indicates viscosity at 100^0C.

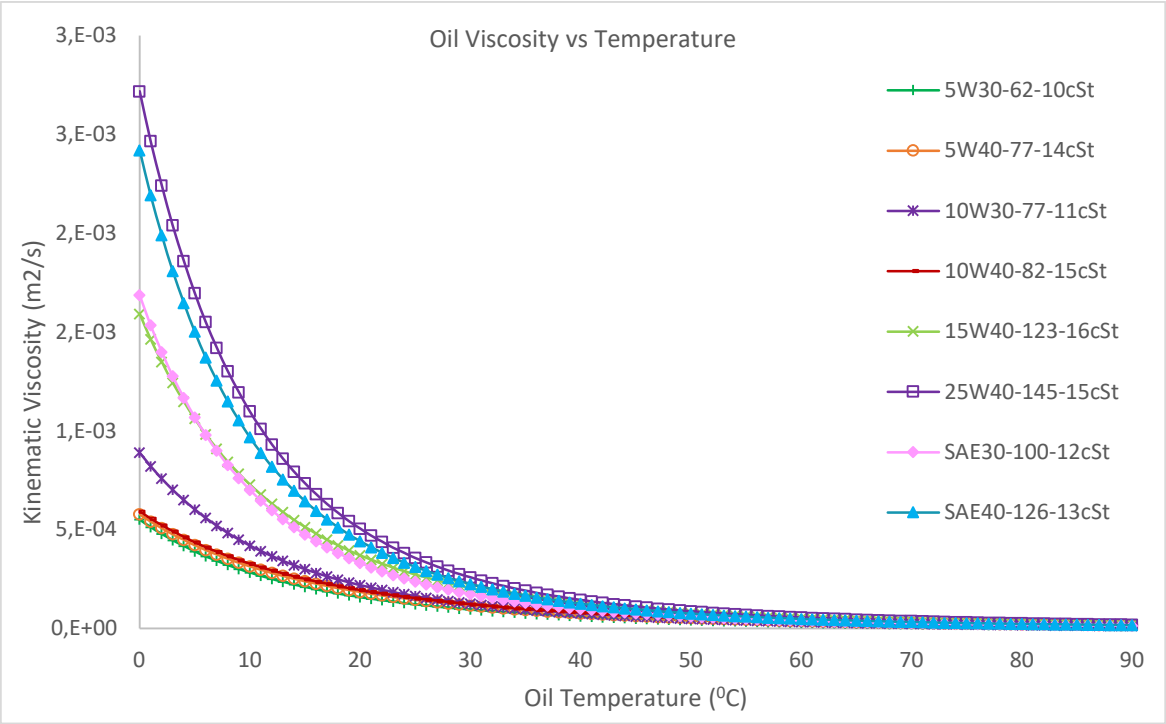


Figure 9. Kinematic viscosity dependent on temperature (enlarged scale)

As seen in Table 2 below, the kinematic viscosities of oil grades are listed for temperatures of 40°C, 90°C, and 100°C. Their viscosities are listed in an order from highest to lowest at the operational temperature of 90°C. Interestingly, despite having lower viscosity than 25W40 at 40°C, the most viscous oil grade at the operational temperature appears to be 15W40. This underscores the importance of defining the operating temperature in the lubrication system to determine the appropriate oil grade and viscosity.

Table 2. Kinematic viscosity comparison of oil grades at 40,90 and 100^0C Temperatures:

Oil Grade	40C cSt	100C cSt	90C cSt
15W40	123	15.6	20.15
25W40	145	15	19.80
10W40	82.14	14.98	18.60
SAE40	126.2	13.2	17.34
5W40	76.5	13.7	17.06
SAE30	100	11.5	14.94
10W30	77	11	13.99
5W30	62	10.4	13.01

III. RESULTS

A. *Bearing clearance impact on minimum oil film thickness and friction power loss*

The results of the calculations for the MOFT and frictional power loss of the main bearing are presented for five different bearing clearances (0.005, 0.01, 0.0325, 0.06, and 0.1mm) and various motor oil grades at a rotation speed of 3000 rpm and an oil inlet temperature of 90°C. These findings are illustrated in Figure 10 and Figure 11.

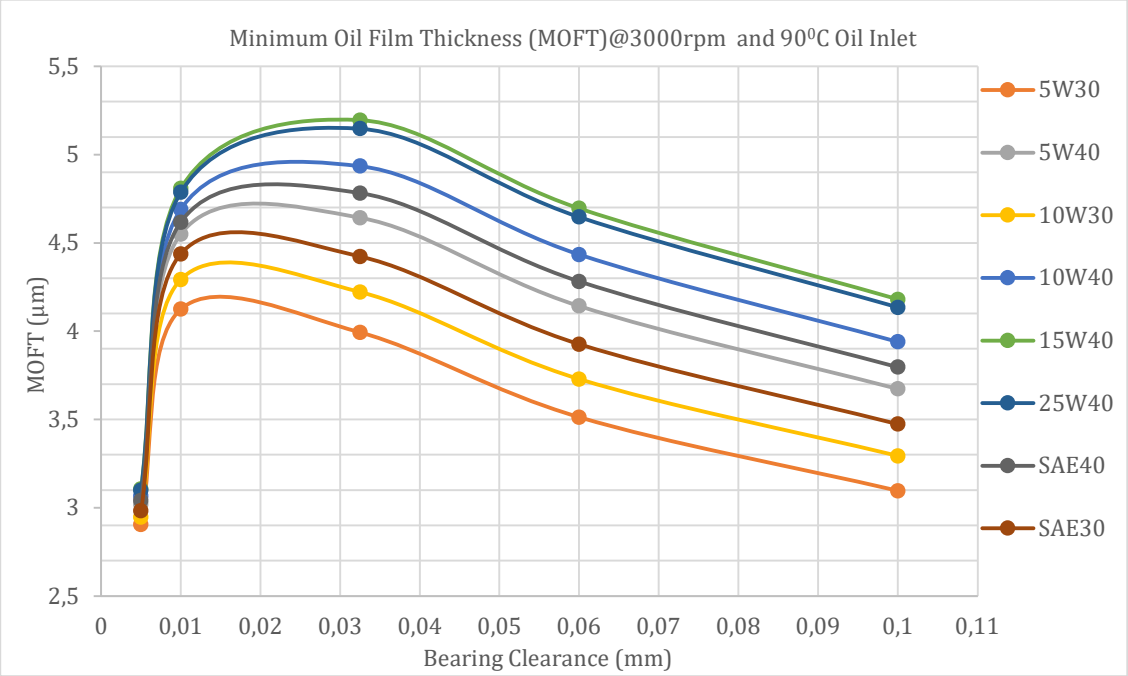


Figure 10. Bearing clearance impact on MOFT for 3000 RPM and 90C oil temperature

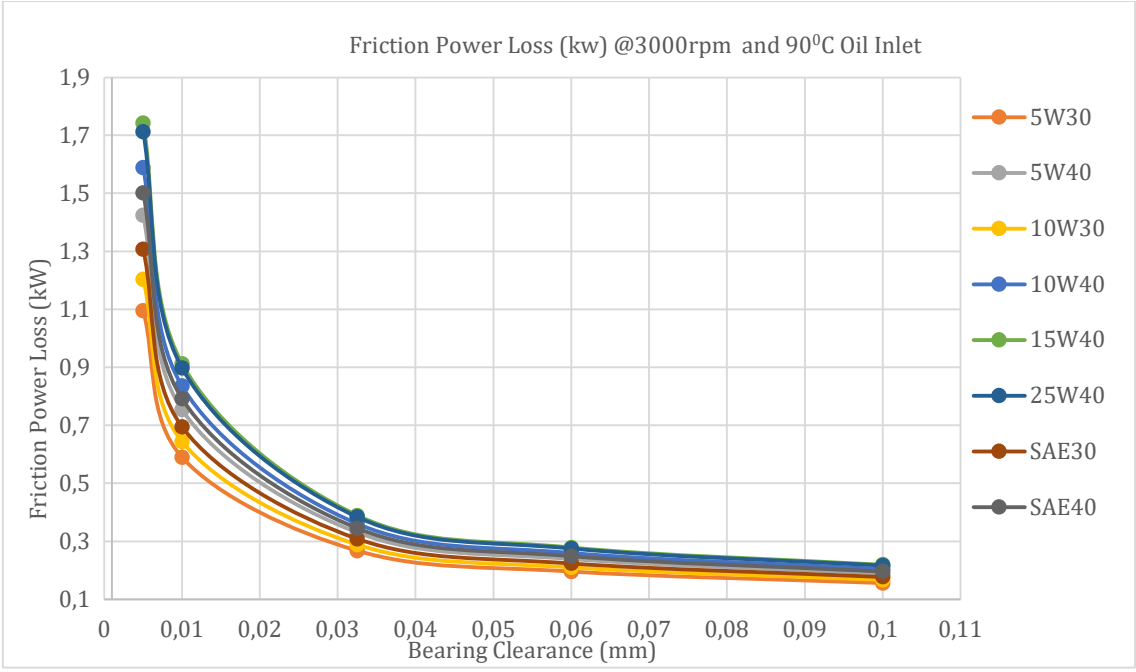


Figure 11. Bearing clearance impact on frictional power loss for 3000 RPM and 90C oil temperature

B. *Engine speed effect on MOFT and frictional power loss*

The results of the calculation for MOFT and frictional power loss of the main bearing for five engine speed (1000-6000rpm) and eight various motor oil grades with 0.0325mm bearing clearance and 90^{0}C oil inlet temperat are shown in Figure 7 and Figure 8.

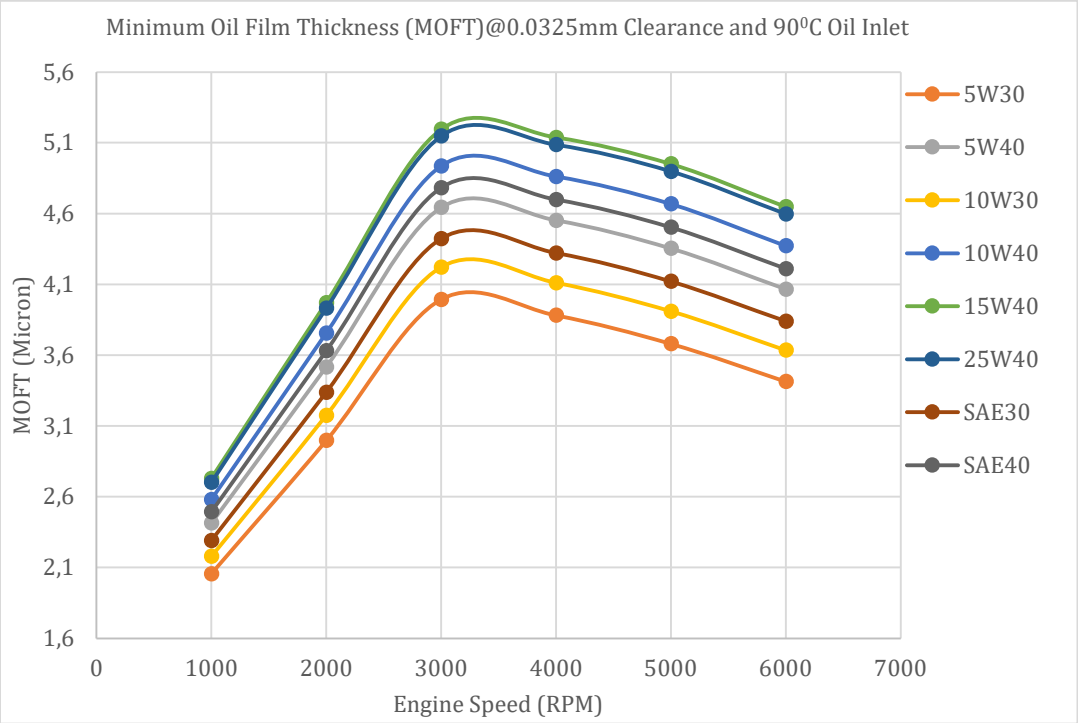


Figure 7. Engine speed impact on MOFT for 0.0325mm clearance and 90C oil temperature

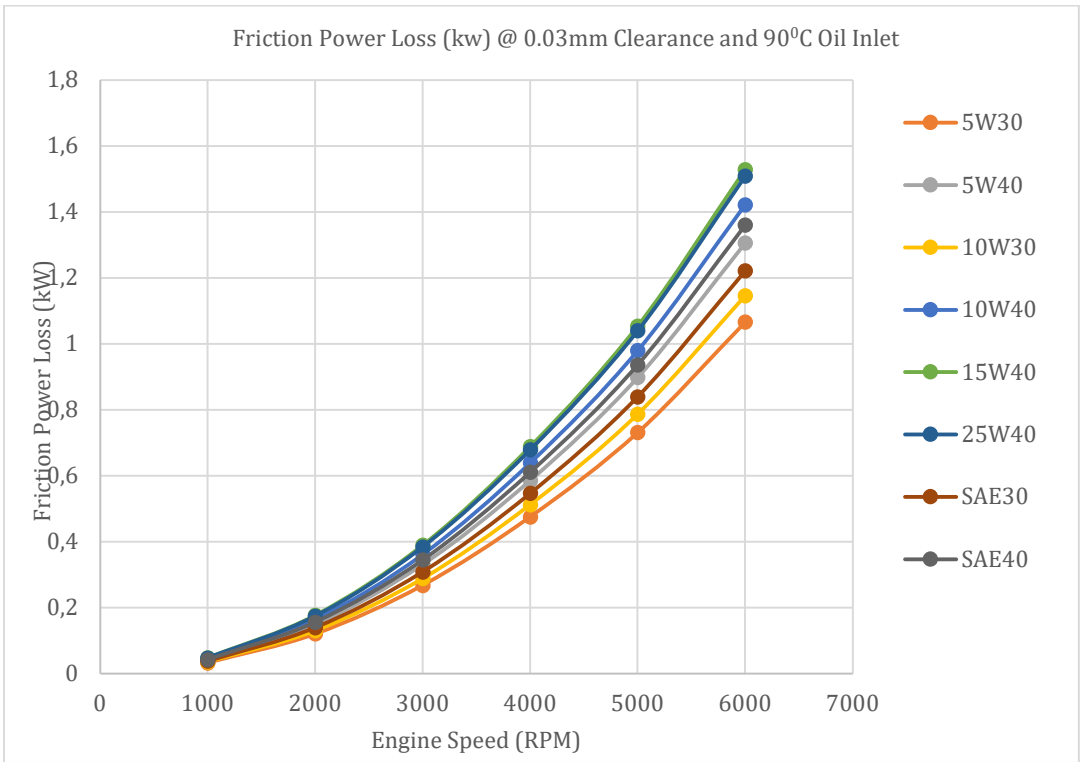


Figure 8. Engine speed impact on frictional power loss for 0.0325mm clearance and 90^{0}C oil temperature

C. *Oil inlet temperature effect on MOFT and frictional power loss*

The results of the calculation for MOFT and frictional power loss of the main bearing for oil inlet temperatures 0, 30, 60, 90 and 120^{0}C and eight various motor oil grades with 0.0325mm clearance and 3000rpm engine speed are shown in Figure 9 and Figure 10.

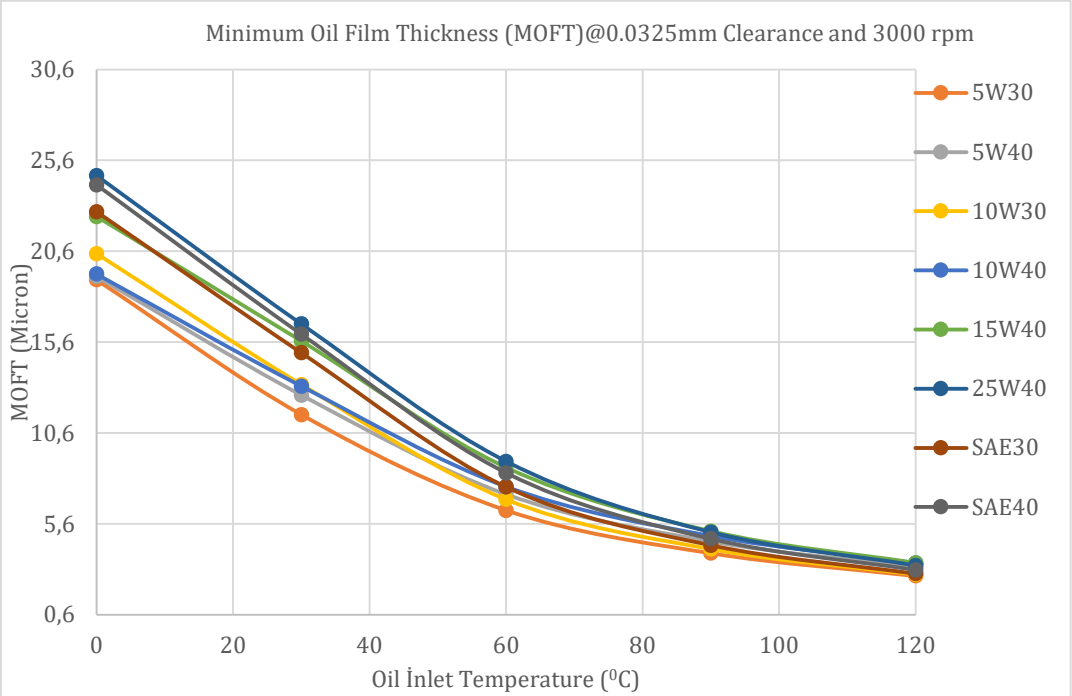


Figure 9. Oil inlet temperature impact on MOFT for 0.0325mm bearing clearance and 3000rpm

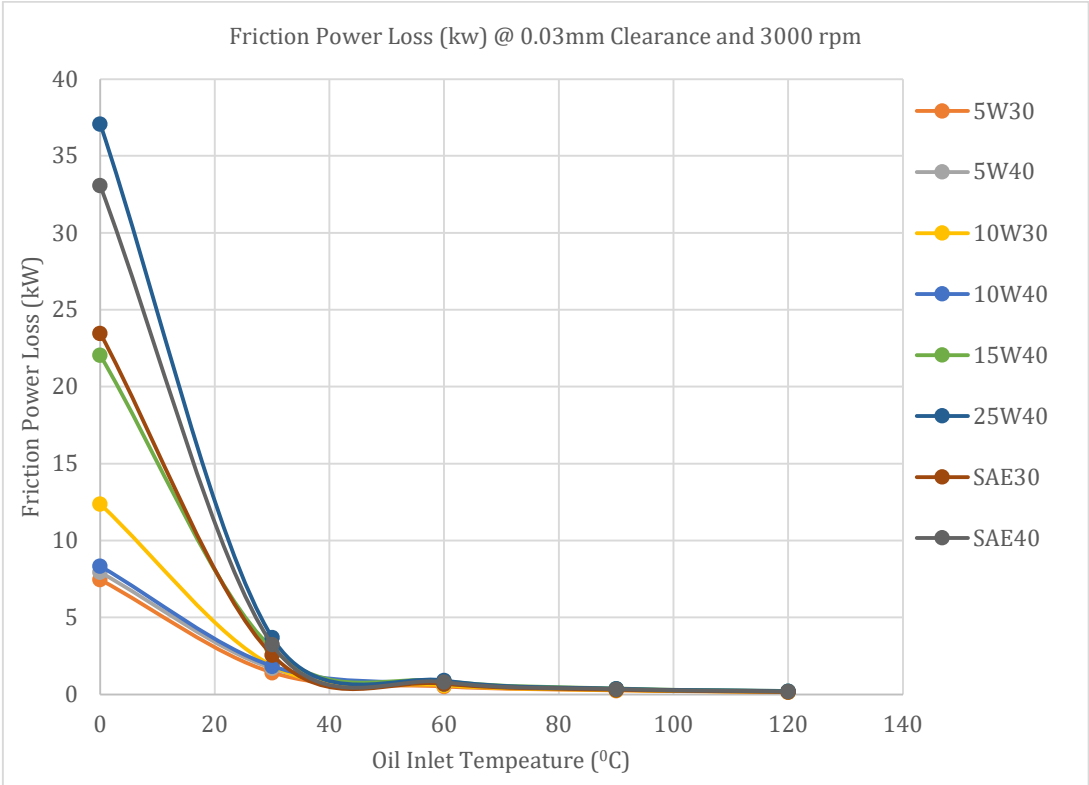


Figure 10. Oil inlet temperature impact on frictional power loss for 0.0325mm clearance and 3000rpm

IV. Discussion

A. *Impact of Bearing Clearance on Minimum Oil Film Thickness and Friction Power Loss*

The MOFT and frictional power loss on the bearing is plotted at varying bearing clearances at 90°C temperature and 3000 rpm as shown in Figure 10 and Figure 11. The analysis of the MOFT against bearing clearance reveals a consistent trend across all oil grades, wherein MOFT initially increases with increasing bearing clearance until reaching a peak value. Beyond this optimal clearance value, MOFT begins to decrease again with further increases in bearing clearance. Notably, the maximum MOFT value shifts towards higher bearing clearances for oils with higher viscosity grades, indicating that higher viscosity oils require larger clearances to achieve optimal lubrication conditions. Among the oil grades studied, the calculation results demonstrate that the 15W40 oil grade provides the most stable hydrodynamic lubrication regime, characterized by the highest MOFT value at a bearing clearance of 0.0325mm. Despite its higher viscosity at lower temperatures, the 25W40 oil grade exhibits lower MOFT values compared to the 15W40 grade across all clearance values.

A comparison between the most fluid oil (5W30) and the most viscous oil grade (15W40) highlights significant differences in MOFT and frictional power loss. For a bearing clearance of 0.0325mm, 3000 rpm, and 90°C oil inlet temperature conditions, the MOFT difference is approximately 30% (3.99 µm for 5W30 vs. 5.20 µm for 15W40). At relatively large clearances such as 0.06mm, higher viscosity oils are expected to generate sufficient hydrodynamic forces to maintain the required MOFT level. Interestingly, the 10W30 and SAE 40 oil grades exhibit similar MOFT values at both 0.0325mm and 0.06mm clearance values, indicating comparable lubrication performance under these conditions. For 5W30 oil, the maximum oil film thickness is attained at a clearance of 0.015 µm, whereas for 15W40 oil grade, it is 0.0325 µm.

The frictional power loss increases with an increase in oil viscosity, but the impact of this increase is less pronounced at larger clearances. At low oil clearances (tight clearances), the rotation of the journal causes significant heating of high-viscosity index oils. Consequently, the frictional power loss at low oil clearances is relatively higher for all grades of lubricants. Frictional power loss decreases sharply up to a certain clearance value. Beyond this point, the decrease occurs more gradually, with not a significant difference compared to the tight clearance value. For a bearing clearance of 0.0325mm, 3000 rpm, and 90°C oil inlet temperature conditions, the frictional power loss difference is approximately 45% (0.27 kW for 5W30 vs. 0.39 kW for 15W40). In Table 3 from the results, for maximum MOFT and optimal FPL observed at 0.0325mm bearing clearance.

Table 3. Comparison of bearing MOFT and FPL for various clearances at 3000 RPM and 90°C oil temperature

OIL GRADE	**PROPERTY 3000rpm, 90C**	**Bearing Clearance (mm)**				
		0,005	0,01	0,0325	0,06	0,1
Oil-5W30-62-10cSt	MOFT(micron)	2,91	4,13	3,99	3,51	3,09
	FPL (kW)	1,10	0,59	0,27	0,20	0,16
Oil-5W40-77-14cSt	MOFT	3,02	4,55	4,64	4,14	3,67
	FPL	1,42	0,75	0,33	0,24	0,19
Oil-10W30-77-11cSt	MOFT	2,95	4,29	4,22	3,73	3,29
	FPL	1,20	0,64	0,29	0,21	0,17
Oil-10W40-82-15cSt	MOFT	3,07	4,69	4,94	4,43	3,94
	FPL	1,59	0,84	0,36	0,26	0,21
Oil-15W40-123-16cSt	MOFT	3,11	4,81	5,20	4,70	4,18
	FPL	1,74	0,91	0,39	0,28	0,22
Oil-25W40-145-15cSt	MOFT	3,10	4,79	5,15	4,65	4,14
	FPL	1,71	0,90	0,38	0,28	0,22
Oil-SAE30-100-12cSt	MOFT	2,98	4,44	4,42	3,93	3,47
	FPL	1,31	0,70	0,31	0,22	0,18
Oil-SAE40-126-13cSt	MOFT	3,04	4,62	4,78	4,28	3,80
	FPL	1,50	0,79	0,35	0,25	0,20
Max-Min MOFT	FLP % change	59	55	45	45	45

B. *Impact of Engine Speed on MOFT and Friction Power Loss*

For all oil grades, the MOFT increases as the engine speed rises, up to a certain point, which appears to be around 3000 rpm. Beyond this threshold, the MOFT begins to decrease, albeit with a smaller slope compared to the initial increase. It's evident from the graphs that the oil with the lowest viscosity exhibits the lowest MOFT, regardless of the rotational speed. On the other hand, friction power loss increases continuously from 1000rpm to 6000 rpm.

Specifically, for this particular bearing, the most stable oil grade appears to be 15W40, with a higher viscosity compared to other grades. For a bearing clearance of 0.0325mm and an inlet temperature of 90°C with 15W40 oil grade, the difference in MOFT is approximately 90% between 1000 rpm and 3000 rpm (2.73µm and 5.2 µm). The difference remains relatively constant for the most liquid oil grade, 5W30. As engine speed increases, friction power loss also increases continuously for all viscosity grades of oil. While the increase is consistent across all grades, higher viscosity oils generally exhibit higher friction power loss. Notably, the most viscous oil grade, 15W40, shows similar values compared to the lower viscosity grade, 25W40. For a bearing clearance of 0.0325mm and an inlet temperature of 90°C with 15W40 oil grade, the friction power difference is approximately 680% between 1000 rpm and 3000 rpm (0.05kW and 0.39kW). In Table 4 from the results, for maximum MOFT and optimal FPL is obtained at 3000 rpm engine speed.

Table 4. Comparison of bearing MOFT and FPL for various engine speeds at 0.0325mm clearance and 90^{0}C oil temperature

OIL GRADE	**PROPERTY 0.0325mm, 90C**	**Engine Speed**					
		1000	2000	3000	4000	5000	6000
Oil-5W30-62-10cSt	MOFT(micron)	2,06	3,00	3,99	3,88	3,68	3,41
	FPL (kW)	0,03	0,12	0,27	0,48	0,73	1,07
Oil-5W40-77-14cSt	MOFT	2,41	3,52	4,64	4,55	4,35	4,07
	FPL	0,04	0,15	0,33	0,59	0,90	1,31
Oil-10W30-77-11cSt	MOFT	2,18	3,18	4,22	4,11	3,91	3,63
	FPL	0,04	0,13	0,29	0,51	0,79	1,15
Oil-10W40-82-15cSt	MOFT	2,58	3,76	4,94	4,86	4,67	4,37
	FPL	0,04	0,16	0,36	0,64	0,98	1,42
Oil-15W40-123-16cSt	MOFT	2,73	3,97	5,20	5,14	4,95	4,65
	FPL	0,05	0,18	0,39	0,69	1,05	1,53
Oil-25W40-145-15cSt	MOFT	2,70	3,93	5,15	5,09	4,90	4,60
	FPL	0,05	0,17	0,38	0,68	1,04	1,51
Oil-SAE30-100-12cSt	MOFT	2,29	3,34	4,42	4,32	4,12	3,84
	FPL	0,04	0,14	0,31	0,55	0,84	1,22
Oil-SAE40-126-13cSt	MOFT	2,49	3,63	4,78	4,70	4,50	4,21
	FPL	0,04	0,16	0,35	0,61	0,94	1,36
Max-Min MOFT	FLP % change	45	46	45	45	44	43

C. *Impact of Oil Inlet Temperature on MOFT and Friction Power Loss*

For all types of oil, the minimum oil film thickness decreases as the oil inlet temperature increases. This decrease exhibits a sharp slope up to a temperature of around 60°C, as observed in the oil viscosity-temperature dependence graph. The decrease in minimum oil film thickness becomes less steep as the temperature approaches 90°C, where the oil viscosity stabilizes. Between 0°C and 60°C, the most viscous oil grade appears to be 25W40. However, around 90°C, the viscosity and therefore the minimum oil film thickness become comparable for all oil grades.

Comparing the minimum oil film thickness (MOFT) and frictional power loss values for 15W40 and 25W40 oil grades at 0°C and 90°C temperatures reveals interesting insights. At around 90°C oil inlet temperature, there is no significant difference in MOFT and frictional power loss between the two oil grades (5.19 µm - 5.15 µm and 0.39 kW - 0.38 kW). However, at around 0°C temperature, there is a 70% difference in power loss between the two oil grades (22.06 µm - 24.76 µm and 22.06 kW - 37.10 kW). This difference is more pronounced for the most fluid oil, 5W30, again at 0°C (19 µm and 7.47 kW) compared to the 25W40 most viscous oil grade, with a 23% decrease in MOFT and a 80% decrease in frictional power loss. In Table 5 from the results, maximum MOFT

obtained with 15W40 oil grade, however optimal FPL is obtained with 10W40 oil grade for a operation range from 0 to 90C temperature .

Table 5. Comparison of bearing MOFT and FPL for various oil inlet temperatures at 0.0325mm clearance and 3000rpm

OIL GRADE	PROPERTY 0.0325mm, 90C	Oil Inlet Temperature (°C)					Max(0C)-Min(90C) MOFT
		0	30	60	90	120	FLP % change
Oil-5W30-62-10cSt	MOFT(micron)	19,03	11,60	6,34	3,99	2,74	
	FPL (kW)	7,47	1,44	0,52	0,27	0,17	27,90
Oil-5W40-77-14cSt	MOFT	19,21	12,68	7,23	4,64	3,23	
	FPL	7,96	1,71	0,64	0,33	0,20	24,06
Oil-10W30-77-11cSt	MOFT	20,47	13,26	6,95	4,22	2,82	
	FPL	12,39	1,87	0,60	0,29	0,17	42,90
Oil-10W40-82-15cSt	MOFT	19,34	13,17	7,64	4,94	3,46	
	FPL	8,35	1,85	0,70	0,36	0,22	23,12
Oil-15W40-123-16cSt	MOFT	22,51	15,66	8,71	5,20	3,45	
	FPL	22,06	2,99	0,87	0,39	0,22	56,66
Oil-25W40-145-15cSt	MOFT	24,76	16,60	9,03	5,15	3,31	
	FPL	37,09	3,72	0,92	0,38	0,21	96,57
Oil-SAE30-100-12cSt	MOFT	22,77	15,01	7,64	4,42	2,87	
	FPL	23,49	2,58	0,70	0,31	0,18	76,15
Oil-SAE40-126-13cSt	MOFT	24,25	16,04	8,40	4,78	3,07	
	FPL	33,09	3,26	0,82	0,35	0,19	95,90

V. Conclusion

Selecting the right oil viscosity is crucial for effective hydrodynamic lubrication, considering factors like bearing load, bearing clearance, oil inlet temperature, and engine RPM speed range. High viscosity oil generally suits high bearing loads at lower engine RPMs, while low viscosity oil reduces friction power loss at higher engine RPMs.

Smaller bearing clearances heighten the risk of metal-to-metal contact and wear, whereas larger clearances improve hydrodynamic lubrication and decrease friction power loss. Optimizing clearance is essential to prevent excessive wear and minimize friction power loss, requiring careful attention. Achieving a balance between friction and lubrication is critical for ensuring smooth operation. Determining an optimal design clearance value for the minimum oil film thickness depends on factors such as the oil grade, bearing loads, and oil operating temperature. In this study, a bearing clearance of 0.0325mm has been identified as providing the optimum minimum oil film thickness when compared to other clearance values under the same engine operating conditions.

Oil inlet temperature affects oil viscosity directly, with higher temperatures(90-120C) reducing viscosity and increasing the risk of insufficient hydrodynamic lubrication and wear. Cold starts(-5-0C) benefit from higher viscosity, reducing the risk of damage of sliding surfaces but increasing the friction power loss. Hot restarts risk thinner oil films, raising the risk of surface contact until proper pressure is restored, decreasing friction power loss. The findings suggest that raising the temperature of lubricant supply from 60°C to 90°C when using SAE 40 oil can result in a substantial reduction in friction potential, exceeding 57%. Moreover, the results indicate that switching from SAE 40 oil to 10W-30 oil could lead to friction reduction potentials of over 17% in the main bearing.

Bearing clearance, engine speed, and oil inlet temperature play crucial roles in determining minimum oil film thickness and frictional power loss. Smaller clearances and higher speeds contribute to increased frictional losses, while cooler oil temperatures can elevate viscosity and further increase frictional losses. Achieving a delicate balance among these factors is paramount for optimizing performance and mitigating wear on sliding surfaces.

Acknowledgment

The authors wish to thank TUBITAK RUTE for the valuable support.

REFERENCES

[1] ZPlus, LLC '' ZPlus™ Tech Brief #11" ZPlus*, LLC Burlington, NC & Corona, CA* www.zddplus.com
[2] Website ''http://www.scribd.com/document/455163944/unit-2-theory-of-lubrication-pdf''
[3] D. D. Fuller ''A Survey of Journal Bearing Literature'' *Amer. Soc. of Lubricating Engineers*, 1958
[4] L. Jilin, S. Lizhong, B. Yuhua, et al. ''Analysis on influence factors of main bearing lubrication characteristics for horizontal diesel engine'' *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7):19-24
[5] L. Jian, Z. Weizheng ''Effect of Rotational Speed on Lubrication Performance of Journal Bearing in Engine'' *Computer Simulation*, 2005, 22(10): 283-286
[6] A. Wang, S. An, T. Nie ''Analysis of Main Bearings Lubrication Characteristics for Diesel Engine '' *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 493 (2019) 012135
[7] K. Dmitri (2011a) "Bearings in internal combustion engines", *Substances and Technologies*
[8] E.P. Apresai, A. Tari, E. A. Ogbonnaya '' Main Bearing Wear Analysis at Varying Load and Speed of the engine'' *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, e-ISSN: 2582-5208, Volume:03/Issue:10/October
[9] J.E. Shigley ''Mechanical engineering design'' *McGraw-Hill Book Company*,1986
[10] J. E. Shigley and C. R. Mischke "Mechanical Engineering Design (in SI units)", sixth edition, *Tata McGraw Hill Publishing*; 2003.
[11] J.W. Robinson, Y. Zhou, P. Bhattacharya, R. Erck, J. Qu, J.T. Bays and L. Cosimbescu ''Probing the molecular design of hyper-branched aryl polyesters towards lubricant applications''. *Scientific reports*, 6(1), pp.1-10 2016.
[12] Website ''https://www.machinerylubrication.com/Read/29654/journal-bearing-oil''
[13] E. Durak, H. Adatepe, A. Biyiklioglu ''Experimental study of the effect of additive on the tribological properties journal bearing under running-in and start-up or shut-down stages'' *Industrial Lubrication and Tribology* 60/3 (2008) 138– 146
[14] A. Krishnan "Simulation of an engine friction strip test", *Master's thesis, Chalmers University of Tecnhology*. 2014
[15] M. Emrich, and M Takats "Detail engine friction estimation using experimentally-simulation approach". *International Scientific Conference of The Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines* 2016
[16] H.S. Patil ''Experimental Analysis of Oil Film Pressure and Temperature on EN31 Alloy Steel Journal Bearing'' *American Journal of Materials Engineering and Technology, 2019, Vol. 7, No. 1, 7-11.*
[17] J. Sun, X. Y. Zhao, H. Wang ''Lubrication analysis of crankshaft bearing considering crankshaft deformation'. *SAE Paper* 2011-01-0613, 2011.
[18] G. W. Stachowiak, A W Batchelor ''Engineering tribology'' *Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann*, 2005.
[19] J. Sun, X. X. Cai, L. P. Liu. ''Research on the effect of whole cylinder block on EHL performance of main bearings considering crankshaft deformation for internal combustion engine'' *ASME Journal of Tribology*, 2010, 132(4): 044502-1-6.
[20] Website''https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effect_of_oil_viscosity_on_hydrodynamic_friction_of_engine_bearings''

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Trafik Sayımı Lokasyon Problemi İçin Ayrıt ve Düğüm Bazlı Modeller

İslam Diri[a], Gökhan Karaköse[a,b]*

[a]Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Akıllı Sistemler Mühendisliği Programı, Bartın/Türkiye.
[b]Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bartın/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** 21619824002@ogrenci.bartin.edu.tr

ÖZET

Trafik sayımı, trafik akışını izlemek ve belirli bir süre boyunca bir istasyondan geçen araç nüfusunu ölçmek için kullanılır. Bu sayım bilgileri daha sonra başlangıç-varış seyahat tahmini yapmamızı ve böylece bir ulaşım ağında daha iyi uzun vadeli planlamaya sahip olmamızı sağlar. Ancak bu süreç çok fazla zaman, yatırım ve iş gücü gerektirebilir. Birçok araştırmacı, daha gerçekçi başlangıç-varış seyahat tahmini amacıyla mevcut kaynakların (örneğin emek, zaman, para) optimum kullanımına odaklanmaktadır. Bu nedenle, yönetici veya karar verici, trafik sayım istasyonlarının konumunu, başlangıç-varış çiftleri arasındaki seyahatlerin nasıl gerçekleştiği hakkında bilgi toplayacak şekilde seçer. Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı, minimum sayma istasyonu sayısını tespit ederken tüm başlangıç-varış yolculuklarını etkin bir şekilde tahmin etmektir. Konumlama çabasının maliyetini en aza indirirken (yani, minimum sayma istasyonu sayısını bulma), sayım istasyonlarının en uygun yerini bulmayı amaçlayan bu problem literatürde trafik sayımı lokasyon problemi olarak bilinir. Bu makale, trafik sayımı lokasyon problem için tüm başlangıç-varış yolculuk çiftlerinin bağlantısını kesmeyi amaçlayan yeni ve etkili ayrıt ve düğüm bazlı Tamsayı Programlama modelleri sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Ağ optimizasyonu, Matematiksel modelleme, Tam-sayılı programlama, Trafik sayım lokasyon problemi*

Arc and node-based models for the traffic counting location problem

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

Traffic counts are used to monitor traffic flow and measure the vehicle population crossing a station during a certain period of time. This count information then allows us to make origin-destination trip estimation and thus have a better long-term planning in a transportation network. However, this process may demand great deal of time, investment and labor force. Many researchers focus on the optimal usage of available resources (e.g. labor, time, money) for the purpose of the more realistic origin-destination trip estimation. Hence, manager, or decision maker, selects the location of traffic count stations such that they gather the information how the trips between origin-destination pairs took place. In this regard, the goal of this study is to effectively estimate all origin-destination trips while locating the minimum number of counting station. This problem is known as traffic counting location problem in the literature, which aims at finding the optimal location of counting stations while minimizing the cost of location effort (i.e., locating the minimum number of counting station). This paper will present new and effective arc and node-based Integer Programming models aimed at disconnecting all origin-destination trip pairs for the traffic counting location problem.

Keywords: *Network Optimization, Mathematical model, Integer programming, Traffic counting location problem*

I. GİRİŞ

Her yıl milyonlarca kazanın yaşandığı karayollarında, binlerce insan hayatını kaybetmektedir. Can kayıpları, yaralanmalar ve maddi kayıpların yanı sıra yakıt tüketimi neticesinde salınan gazlar küresel bir tehdit oluşturmaktadır. Bu sorunların çözümü noktasında karayolları ulaşım ağlarının izlenilmesi ve iyileştirilmesi elzemdir. Trafik akışını izlemek ve belirli bir süre boyunca bir istasyondan geçen araç

nüfusunu ölçmek için trafik sayımı yapılır [1]. Bu sayım bilgileri daha sonra başlangıç-varış seyahat tahmini yapmamızı ve böylece bir ulaşım ağında daha iyi uzun vadeli planlamaya sahip olmamızı sağlar [2]. Bu planlama neticesinde daha güvenli ve verimli ulaşım ağını oluşturmak amaçlanır. Ancak bu süreç çok fazla zaman, yatırım ve iş gücü gerektirebilir. Birçok araştırmacı, daha gerçekçi başlangıç-varış seyahat tahmini amacıyla mevcut kaynakların (örneğin emek, zaman, para) optimum kullanımına odaklanmaktadır. Bu nedenle, yönetici veya karar verici, trafik sayım istasyonlarının konumunu, başlangıç-varış çiftleri arasındaki seyahatlerin nasıl gerçekleştiği hakkında bilgi toplayacak şekilde seçer.

Buradan hareketle, trafik sayım sensör lokasyonların tespiti ile alakalı literatür taramasında özellikle son yıllarda yapılan ve uygulama alanı bulan çalışmalar incelenmiştir. Trafik sayımı lokasyon problemini bir optimizasyon problemi olarak ilk [3]' te ele alınmıştır. İlgili çalışmada araştırmacılar, problemin çözümüne ilişkin en kısa yol tabanlı sütun oluşturma, dal ve sınır algoritması önermiştir. Bir başka çalışmada araştırmacılar, bir ağdaki trafik sensörlerinin konumunu belirlemek için başlangıç ve varış noktaları arasındaki bağlantıyı engelleyecek şekilde sensörlerin konumunu tespit etmeye çalışmış ve ilgili problemin çözümü için Dal ve Kes Algoritması ile Kümeleme Araması yöntemlerini önermişlerdir [4]. İlgili çalışmada, araştırmacılar Brezilya'daki tüm belediyeler arasındaki trafik akışını tespit edebilecek sensörlerin optimal yerleşimini bulmayı amaçlamıştır. Daha sonra, [4]' teki çözüm yöntemlerine ek olarak [5]' te aşamalı küme kapsama tabanlı bir hibrit algoritma geliştirilmiştir.

Yukarıda çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışma akış çiftleri arasındaki akışların ölçümü için çiftler arasındaki her rotaya en az bir sensör yerleşimini en az sayıda sensörle yapmayı amaçlayan optimizasyon probleminin çözümüne odaklanmıştır. Fakat, literatürde önerilen tam-sayılı programlama modelinin çözümü düşük hesaplama performansına sahiptir ve bu nedenle bu modelin herhangi bir platformda direkt çözümü yerine yukarıda bahsedildiği gibi araştırmacılar alternatif çözüm yöntemleri önermişlerdir. Bu çalışma ile ilk kez kısıt azaltıcı yaklaşım sayesinde ilgili optimizasyon modeli kısa sürede çözülebilir hale gelecektir. Ayrıca bu çalışma ile literatürdeki ayrıt üzerine sensör yerleşim problemine ek olarak düğüm üzerine sensör yerleşim problemi de ele alınacaktır.

II. MATERYAL METOT

Bu kısımda ilk olarak, [3]' te verilen ayrıt üzerine konumlandırılacak sensörlerin optimal lokasyonlarını bulacak matematiksel model verilecektir. Ulaşım ağı G grafı ile temsil edilsin. Graf G' de düğümler N ve ayrıtlar A ile temsil edilsin. Ayrıca, G grafı üzerindeki tüm akış çiftleri $w \in W$ ve akış çiftlerinin kullanacağı rotalar $r \in R$ ile temsil edilsin. Optimizasyon modeline ait parametre aşağıda verilmiştir.

$$\delta_{ij}^{wr} = \begin{cases} 1, \text{eğer ayrıt } ij \text{ akış çifti } w'\text{nun } r \text{ rotası üzerindeyse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Modele ait karar değişkeni ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{eğer trafik sayım sensörü ayrıt } ij \text{ üzerine yerleştirilirse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Böylelikle, akış çiftleri arasındaki tüm akışları izleyebilecek ayrıtlara yerleştirilmiş minimum sayıda sensörün konumunu aşağıda verilen ayrıt-tabanlı tam-sayılı matematiksel model (ATM) ile bulunabilir.

$$\min \sum_{(i,j)\in A} x_{ij} \tag{1}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \delta_{ij}^{wr} x_{ij} \geq 1, \forall\, r \in R, w \in W \tag{2}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall\, (i,j) \in A \tag{3}$$

ATM' de Amaç Fonksiyonu (1), ağdaki tüm akış çiftleri arasındaki toplam akışı tespit etmek için ayrıtlara yerleştirilmiş trafik sayım sensörü sayısını en aza indirir. Kısıt (2), her bir akış çiftinin her bir rotasında bulunan ayrıtlardan en az birine bir adet sensör yerleşimini garanti eder. Böylece, tüm rotalardaki akışlar ve dolayısıyla tüm akış çiftleri arasındaki toplam akış tespit edilebilir. Kısıt (3) ise x karar değişkeninin tipini belirler.

Yukarıda verilen ATM, ağdaki akışların düğüme yerleştirilmiş sensörler ile izlenilmesi istenildiğinde, yapılacak ek kısıtlama ile düğüm-tabanlı tam-sayılı matematiksel model (NTM) şekline kolaylıkla dönüştürülebilir. Burada, düğüme yerleştirilen sensör ile ilgili düğüme bağlı tüm ayrıtlardaki akışın ölçülebileceği varsayılmaktadır. NTM için yeni bir karar değişkeni aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{eğer trafik sayım sensörü düğüm } i \text{ üzerine yerleştirilirse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Akış çiftleri arasındaki tüm akışları izleyebilecek düğümlere yerleştirilmiş minimum sayıda sensörün konumunu aşağıda verilen NTM ile bulunabilir.

$$\min \sum_{i \in A} y_i \tag{4}$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^{wr} x_{ij} \geq 1, \forall\, r \in R, w \in W \tag{5}$$

$$x_{ij} \leq y_i + y_j, \forall\, ij \in A \tag{6}$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\}, \forall\, (i,j) \in A, i \in N \tag{7}$$

Yukarıda görüldüğü gibi NTM' de amaç fonksiyonu revize edilmiştir. Yeni Amaç Fonksiyonu (4), ağdaki tüm akış çiftleri arasındaki toplam akışı tespit etmek için düğümlere yerleştirilmiş trafik sayım sensörü sayısını en aza indirir. Görüldüğü üzere, NTM' ye ATM' de olmayan Kısıt (6) eklenmiştir ve yeni karar değişkeni y, Kısıt (7)' de verilmiştir. Kısıt (5) daha önce açıklandığından tekrar açıklanmayacaktır. Kısıt (6), eğer bir düğüme sensör yerleştirilmiş ise o düğüme bağlantılı tüm ayrıtlara sensör yerleştirilmiş gibi modelin çalışmasını garanti eder. Kısıt (7) ise karar değişkenlerinin tipini belirtir. Görüldüğü üzere karar değişkenleri x ve y birer ikili (binary) değişkendir.

NTM' de kısıt ve karar değişkeni sayısı aşağıda verilen parametre kullanımı ile azaltılabilir.

$$\delta_i^{wr} = \begin{cases} 1, \text{eğer düğüm } i \text{ akış çifti } w' \text{nun } r \text{ rotası üzerindeyse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Hesaplama testlerinde kullanılacak olan NTM' nin son hali aşağıda verilmiştir.

$$\min \sum_{i \in N} y_i \tag{8}$$

$$\sum_{i \in N} \delta_i^{wr} y_i \geq 1, \forall\, r \in R, w \in W \tag{9}$$

$$y_i \in \{0,1\}, \forall\, i \in N \tag{10}$$

Amaç Fonksiyonu (8) ve Kısıt (10) daha önce açıklanmıştır. Kısıt (9) ise Kısıt (2)' ye benzer şekilde akış çiftleri arasındaki her rotaya en az bir düğüm sensörü yerleştirilme durumunu garanti eder.

Yukarıda verilen hem ATM' deki Kısıt (2) hem de NTM' deki Kısıt (8), verilen akış çiftleri arasındaki tüm rotaların üretilmesi ve üretilen rotaların işlemesini gerekli kılar. Bu kısıtlar ATM ve NTM' nin direkt kullanımını önemli ölçüde engeller. Bu çalışma ile bu engeli ortadan kaldıracak Kısıt Azaltma Yöntemi (KAY) önerilmiştir. KAY aşağıdaki adımları izler.

(1) Akış çifti w seçilir.
   a. Akış çiftindeki başlangıç düğümüne komşu bir düğüm hariç diğer düğümler ağdan kaldırılır.
   b. Ağdaki ilgilenilen w akış çifti düğümleri hariç diğer tüm başlangıç/varış akış düğümleri ağdan kaldırılır.
   c. Eğer akış çifti w' daki başlangıç düğümünden varış düğümüne bir rota varsa, tüm olası rotalar türetilir, aksi halde rotalar türetilmez.
   d. Daha sonra tekrardan başlangıçtaki ağa dönüş yapılır.

(2) Başka bir akış çifti w' seçilir ve tüm akış çiftleri irdeleninceye kadar bu işleme devam edilir.

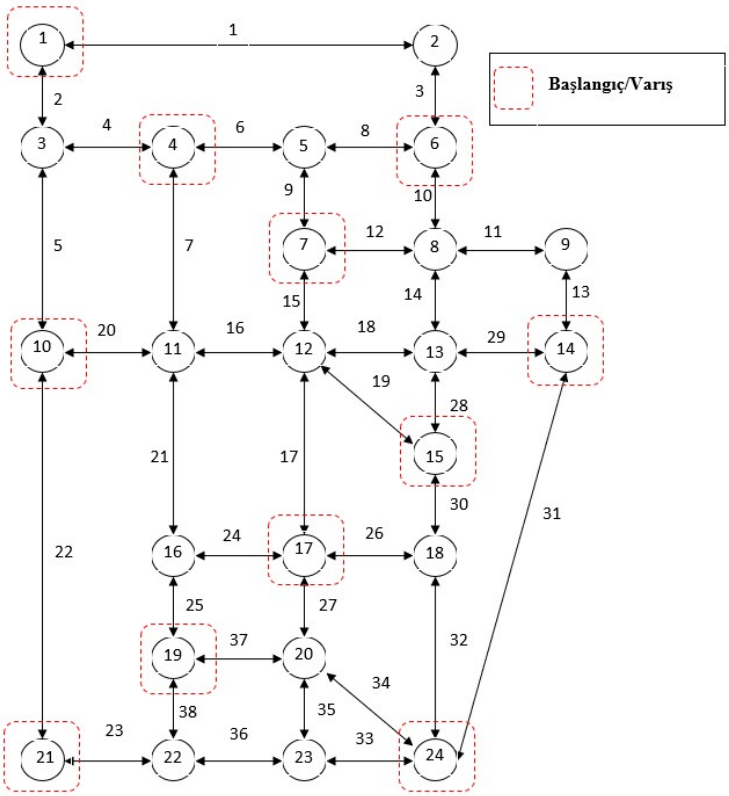
KAY ile bulunan akış çiftleri arasındaki rota kümesi RK ile temsil edilsin. Artık ATM' deki Kısıt (2) ve NTM' deki Kısıt (9) sırasıyla, Kısıt (11) ve Kısıt (12) şeklinde revize edilir. Diğer kısıtlarda ise herhangi bir değişiklik yapılmaz.

$$\sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^{wr} x_{ij} \geq 1, \forall\, \boldsymbol{r} \in \boldsymbol{RK}, w \in W \tag{11}$$

$$\sum_{i \in N} \delta_i^{wr} y_i \geq 1, \forall \boldsymbol{r} \in \boldsymbol{RK}, w \in W \quad (12)$$

III. SONUÇLAR

Modellerin hesaplama testleri için [6]' dan alınmış literatürde iyi bilinen test ağlarından "Sioux Falls" ağı kullanılacaktır. Şekil 1' de verilen bu ağ 24 adet düğüm ve 38 adet yönsüz ayrıttan oluşmaktadır. Bu ağda, 1, 2, 4, 6, 7, 10, 14, 15, 17, 19, 21 ve 24 düğümlerinin akışların başladığı ve sonlandığı başlangıç/varış düğümleri olduğunu varsayalım. Bu varsayım üzerine (1,10) bir akış çiftidir. Bu akış çifti için, ayrıtlar yönsüz olduğundan, düğüm 1' den düğüm 10' a akışın geçişine olanak tanıyacak en az bir rota varsa, bunun terside olmalıdır. Dolayısıyla, modellerde akış çiftlerinin tek yönlü şekilde irdelenmesi yeterlidir.



Şekil 1. Sioux Falls Ağı

Sioux Falls ağı için ATM ve NTM, GAMS platformu üzerinden CPLEX 12.6.2.0 çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Modellerin direkt GAMS üzerinden çözümü ve modeller ile KAY entegrasyonu sonucu elde edilen çözüm süreleri aşağıdaki Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Modellerin Hesaplama Testleri

Optimal Çözüm	Çözüm Süresi (saniye)		Optimal Çözüm	Çözüm Süresi	
	ATM	ATM+KYM		NTM	NTM+KYM
22	23.5	0.23	8	23.2	0.094

Tablo 1' de görüldüğü üzere 22 tane ayrıt sensörü ya da 8 tane düğüm sensörü yerleştirilerek Şekil 1' de verilen ağdaki tüm akış çiftleri arasındaki akışlar izlenebilirdir. Tablo 1' de verilen çözüm sürelerine baktığımızda ise hem ATM hem de NTM' ye KYM entegrasyonu ile çözüm sürelerinde önemli ölçüde azaltım sağlanmıştır. Spesifik olarak, ATM ve NTM bu ağ için sırasıyla 23.5 ve 23.2 saniyede optimal çözümü buluyorken, KYM entegrasyonu ile bu modellere ait optimal çözümü döndürme süreleri sırasıyla 0.23 ve 0.094 saniyeye kadar inmiştir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada trafik sayım sensörlerinin hem ayrıt hem de düğümlere yerleştirilmesi durumlarını içeren modeller sunulmuştur. Bu modellerden ATM, minimum sayıda sensör kullanımı ile verilen bir ulaşım ağındaki tüm çiftler arasındaki akışı ayrıtlara sensör yerleşimi yaparak tespit ederken, NTM ise aynı amaca düğümlere sensör yerleşimi yaparak ulaşmaya dönüktür. Bir önceki kısımda belirtildiği üzere Kısıt Azaltma Yöntemi (KAY) ile hem ATM hem de NTM için çözüm sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azaltma KAY' ın önemli ölçüde takip edilmesi gereken rota sayısını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Spesifik olarak, ATM ve NTM ile 182,492 rota takip edilirken, ATM+KAY ve NTM+KAY ile sadece 87 rotanın takip edilmesi ile optimal çözümün bulunması sağlanmıştır. Bu ise çözüm süresine ek olarak bellek kullanımında önemli ölçüde azaltma sağlayacaktır. Bu sayede, belirli boyuttaki ulaşım ağları için daha önce direkt olarak tercih edilmeyen rota-bazlı ATM ve NTM artık tercih edilebilirdir. Bu ise bu çalışmanın literatüre önemli bir katkısı olarak düşünülmektedir. Ayrıca, ATM' den NTM' ye dönüştürmek kolay dahi olsa, literatürde böyle bir dönüştürme işleminin yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bu noktadan, bu çalışmanın bundan sonraki çalışmalar için araştırmacılara kolaylık sağlanacağı da düşünülmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma ile ayrıt ve düğümlere sensör yerleşimi yaparak, bir ulaşım ağındaki akış çiftleri arasındaki akışların tamamını tespit edecek tam-sayılı matematiksel modeller önerilen KAY ile artık daha hızlı çözülebilir ve belirli boyuttaki ulaşım ağlarına uygulanabilir olmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] A. Chen, S. Pravinvongvuth, P. Chootinan, M. Lee, and W. Recker. "Strategies for selecting additional traffic counts for improving o-d trip table estimation," *Transportmetrica*, 3, 191–211, 2007.

[2] E. Castillo, Z. Grande, A. Calviño, W. Y. Szeto, and H.K. Lo. "A state-of-the-art review of the sensor location, flow observability, estimation, and prediction problems in traffic networks," *Journal of Sensors*, 1–26, 2015.

[3] H. Yang, C. Yang, and L. Gan. "Models and algorithms for the screen line-based traffic-counting location problems," *Computers & Operations Research*, 33(3), 836-858, 2006.

[4] P. H. González, G. Clímaco, G.R. Mauri, B.S. Vieira, G.M. Ribeiro, R.D. Orrico Filho, L. Simonetti, L.R. Perim, and I.C.S. Hoffmann. "New approaches for the traffic counting location problem," *Expert Systems with Applications*, 132, 189–198, 2019.

[5] B.S. Vieira, T. Ferrari, G.M. Ribeiro, L. Bahiense, R.D. Orrico Filho, C.A. Abramides, and N.F.R.C. Júnior. "A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem", *Expert systems with applications*, 160, 113641, 2020.

[6] Transportation Networks for Research Core Team. *Transportation Networks for Research*. [Online]. Available: http://www.ieee.org/ https://github.com/bstabler/TransportationNetworks.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yüksek Sıcaklıkta Nitrürleme İşlemi ile Dubleks Paslanmaz Çeliklerde Östenitik Dönüşüm

Mutlu Çağrı YİĞİT[a], Özge ARARAT[a], Ersoy ERİŞİR[a]*

[a]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** mutlucagriyigit@gmail.com

ÖZET

Yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi paslanmaz çeliklerde yüksek azot çözünmesi sağlamak amacıyla yüksek sıcaklıklarda azot atmosferinde uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada, soğuk haddelenmiş bir dubleks (ferritik-östenitik) paslanmaz çeliğe yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Dubleks paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim kullanılarak artan azot miktarının faz dönüşümlerine etkisi ThermoCalc yazılımı ile hesaplanmıştır. Böylece, yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi sırasında oluşabilen fazlar öngörülmüştür. Deneysel çalışma olarak yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi 1100 °C sıcaklıkta farklı tutma sürelerinde ve farklı basınç değerleri altında saf azot gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemeler ışık mikroskobu ile yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri üzerinden ImageJ programı ile yüzeyden farklı uzaklıkta bulunan segmentlerde görüntü analizi yapılmıştır. Yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi sonrasında farklı basınç ve tutma sürelerine bağlı olarak yüzeyde farklı kalınlıklarda östenitik bölgenin oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *dubleks paslanmaz çelik, hesaplamalı malzeme mühendisliği, faz dönüşümü, yüksek sıcaklıkta nitrürleme*

Austenitic Transformation in Duplex Stainless Steel using High-Temperature Solution Nitriding

ABSTRACT

High-temperature nitriding (HTSN) is a method used to obtain high dissolution of nitrogen in stainless steels under a nitrogen atmosphere at elevated temperatures. In this study, the HTSN was applied to a cold-rolled duplex (ferritic-austenitic) stainless steel. The effect of increasing nitrogen content on phase transformations was calculated using the ThermoCalc software, based on the chemical composition of duplex stainless steel. Thus, the phases and critical phase transformation temperatures were predicted to establish suitable HTSN window. As an experimental study, the HTSN was conducted at 1100 °C with different holding times and under different pressure values in a pure nitrogen gas atmosphere. Microstructural examinations were performed using a light microscope. Image analysis of segments at different distances from the surface was conducted using the ImageJ program using light microscope images. Following the HTSN, it was determined that austenitic regions with different thicknesses formed on the surface, depending on the pressure and holding times.

Keywords: *Duplex Stainless Steel, Computational Materials Engineering, Phase Transformation, High-Temperature Nitriding)*

I. GİRİŞ

Dubleks paslanmaz çelikler östenit ve ferritten oluşan mikroyapıları sayesinde diğer paslanmaz çeliklere göre daha yüksek korozyon direncine ve mekanik özellikler sunabilmektedir. Dubleks paslanmaz çelikler yüksek korozyon direnci, yüksek dayanım ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip olmasından dolayı petrokimya, deniz taşımacılığı, enerji üretim tesisleri, hidrometalurji gibi alanlarda tercih edilmektedir ([1], [2]).

Yüksek sıcaklıkta çözelti nitrürleme (HTSN) işlemi, yüksek sıcaklıklarda N_2 atmosferinde ısıl işlem yoluyla azotun paslanmaz çelik yüzeyine nüfuz ettirilmesi işlemidir. Östenit yapıcı bir alaşım elementi olan azot HTSN işlemi sırasında paslanmaz çeliğin yüzeyinden difüze olduğunda, nüfuz eden azot miktarına ve

işlemin yapıldığı sıcaklığa bağlı olarak yüzeye yakın konumda mikroyapı östenite dönüşmektedir. Oluşan azota aşırı doymuş östenit tabakası paslanmaz çeliğin yüzeyinde korozyon direncini ve mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi, dubleks, martenzitik, ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklere uygulanabilmektedir [3], [4].

Referans [5], AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte yüksek sıcaklıkta nitrüleme ve temperleme sonrası faz dönüşümlerini incelemişlerdir. AISI 430 paslanmaz çeliğine 1050 ve 1100 °C sıcaklıklarda 0.98 bar basınç altında 10 saatlik bir yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi sonrası bazı numunelere 1100 °C'de 2 saat çözelti tavlaması ardından 200-750 °C arası temperleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonunda korozyon direncinin arttığı, temperleme yapıldıktan sonra oluşan Cr_2N çökeltileriyle korozyon direnci ve sertlik azaldığı görülmüştür.

Yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi, dubleks paslanmaz çeliklere uygulanabilmektedir. Azotun dubleks paslanmaz çeliklerde arayer atom olarak çözünmesi, çift fazlı yapıdan tek fazlı östenite dönüşümünü gerçekleştirmektedir. 1000-1200 °C sıcaklıkları arasında dubleks paslanmaz çeliklere uygulanan yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi sonucunda azota aşırı doymuş östenit tabakası meydana gelmektedir. Oluşan östenit tabakası sonucunda korozyon direncini ve sertlikte artış görülmüştür [6].

Referans [7], dubleks paslanmaz çelikte F/Ö oranının yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemine etkisini incelemişlerdir. 2205 çeliğine HTSN işlemi öncesi farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi uygulayıp 1125 °C 0.3 bar 1 saat ve 2.5 saat HTSN işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu işlem sonucunda dubleks paslanmaz çeliğin çözelti nitrürlemesinde meydana gelen tane büyümesi ön tavlama ile meydana gelen ferrit fraksiyonu ile önlendiği görülmüştür.

Referans [8], 2.5 mm kalınlığında DIN 1.4462 dubleks paslanmaz çeliğine 1200 °C'de 5 saat HTSN işlemi uygulamışlardır. HTSN işlemi sonrasında, yüzeydeki azot miktarı östenitik dönüşüm için yeterli olduğu gösterilmiştir. Farklı azot içeriğine sahip 3 farklı mikroyapı bölgesi görülmüştür. Azotça zengin östenitik yüzey tabakası, östenitik matristen oluşan bir geçiş bölgesi ve merkezde dubleks yapı gözlemişlerdir.

II. MATERYAL METOT

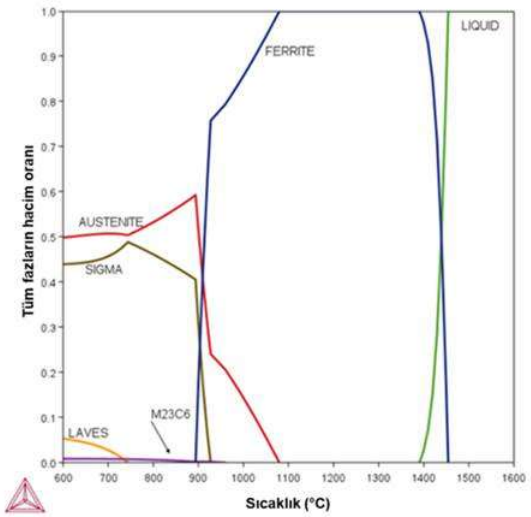
Bu çalışmada soğuk haddelenmiş Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Soğuk haddelenmiş dubleks paslanmaz çeliğe 1100 °C sıcaklığında 1.5 ve 2.5 bar azot basıncı altında 15, 30 ve 60 dakikalık sürelerde yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Mikroyapısal inceleme öncesinde numune öncelikle soğuk bakalite alınmıştır. Kaba ve ince zımparalama yapıldıktan sonra 1 ve 3 mikronluk elmas solüsyon ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. 122 ml Etil Alkol+ 122 ml HCl+ 6 ml Nitrik Asit+ 2.4 g $CuCl_2$ + 8.5 g $FeCl_3$ içeriğine sahip Carpenter çözeltisi ile numune dağlanmıştır. Işık mikroskobu görüntüleri ile faz dönüşümleri incelenmiştir. ImageJ yazılımı ile ışık mikroskobu görüntülerinde görüntü analizi yapılmıştır.

Tablo 1. Dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu

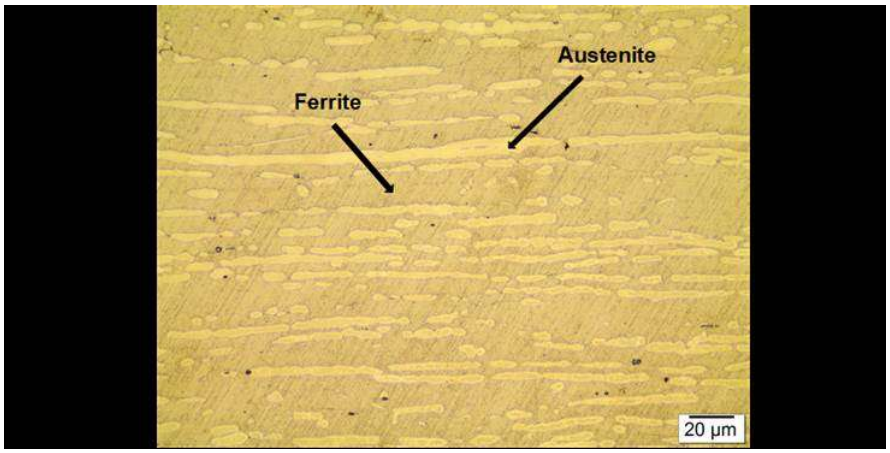
Element	**C**	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Fe**
Ağırlık (%)	0.043	14.05	0.16	20.25	2.08	3.36	Kalan

III. SONUÇLAR

HTSN işleminden önce ThermoCalc yazılımı kullanılarak Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış faz oranları belirlenmiştir. Şekil 1'de Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış denge diyagramı verilmiştir. Denge diyagramı incelendiğinde ergimenin 1390 °C sıcaklıkta başladığı görülmektedir. Sıvı fazdan ilk olarak delta ferrit oluşmaktadır. Katılaşma esnasında sırasıyla δ-ferrit, östenit, sigma ve Laves fazlarının oluşabileceği öngörülmektedir. 1080-1390 °C sıcaklık aralığında tek fazın δ-ferrit olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi 1100 °C 'de öngörülen tek faz bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de çalışmada kullanılan soğuk haddelenmiş dubleks paslanmaz çeliğin ışık mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Soğuk hadde sonucu östenit tanelerinin hadde yönünde uzama gösterdiği görülmektedir.

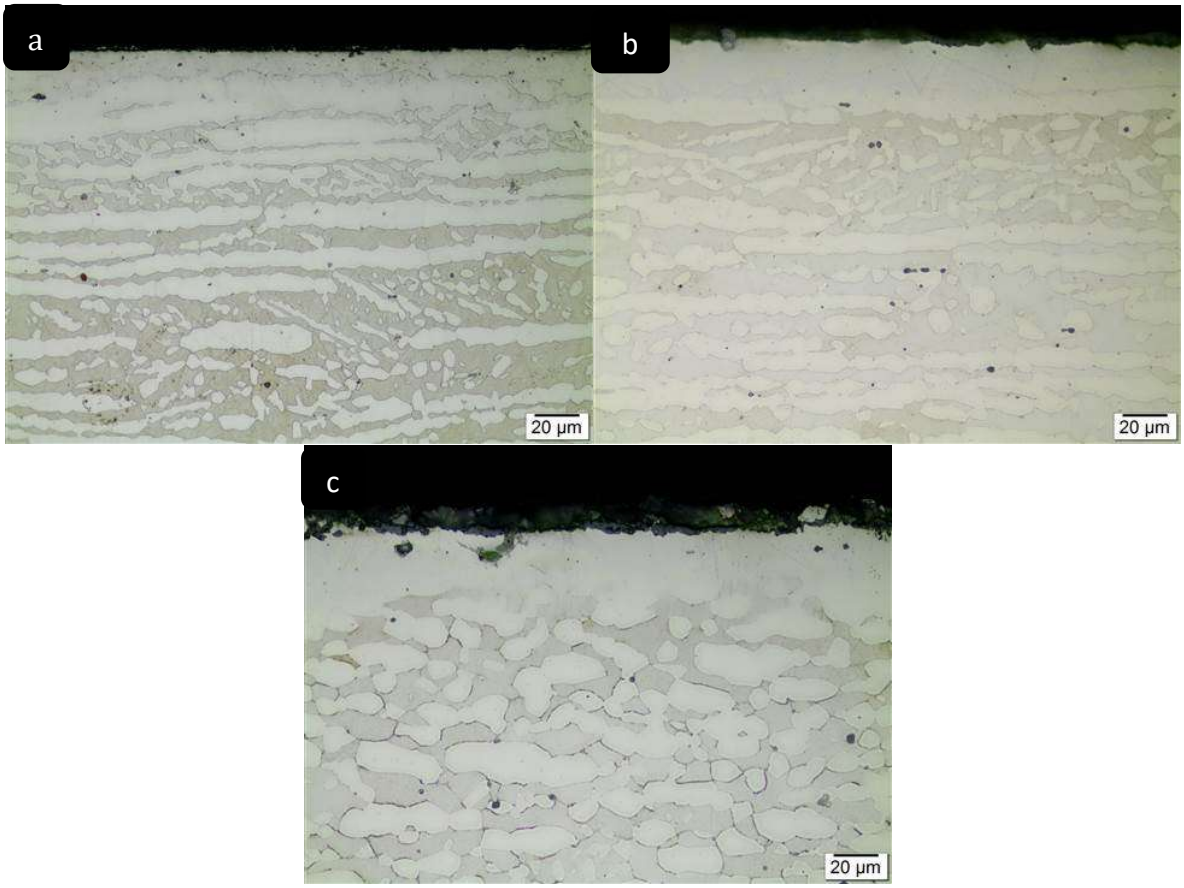


Şekil 1. Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış denge diyagramı

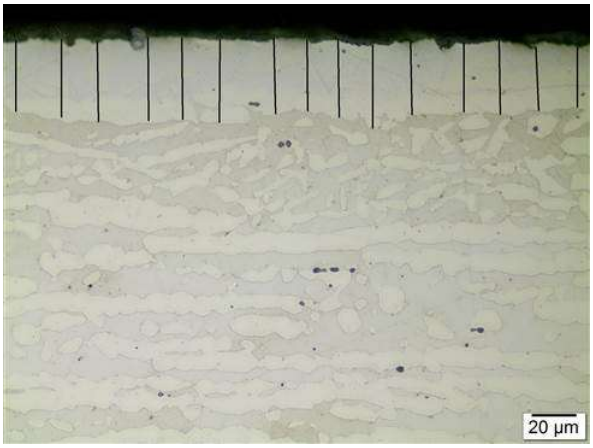


Şekil 2. Soğuk hadde sonrası dubleks paslanmaz çeliğin IM görüntüsü

Şekil 3'te 1100 °C 1.5 barda gerçekleştirilen yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonrası alınan boyuna kesit numunelerinin ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Şekil 4'te ImageJ programı kullanılarak ışık mikroskobu görüntüleri üzerinden azota aşırı doymuş östenit tabakasının kalınlığının ölçümü gösterilmiştir. Tablo 2'de sunulan ImageJ üzerinden gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre sürenin artmasıyla birlikte oluşan östenit tabakasının kalınlığı arttığı görülmüştür.



Şekil 3. 1100 °C 1.5 bar yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonrası IM görüntüleri (a-15 dk, b-30 dk, c-60 dk)

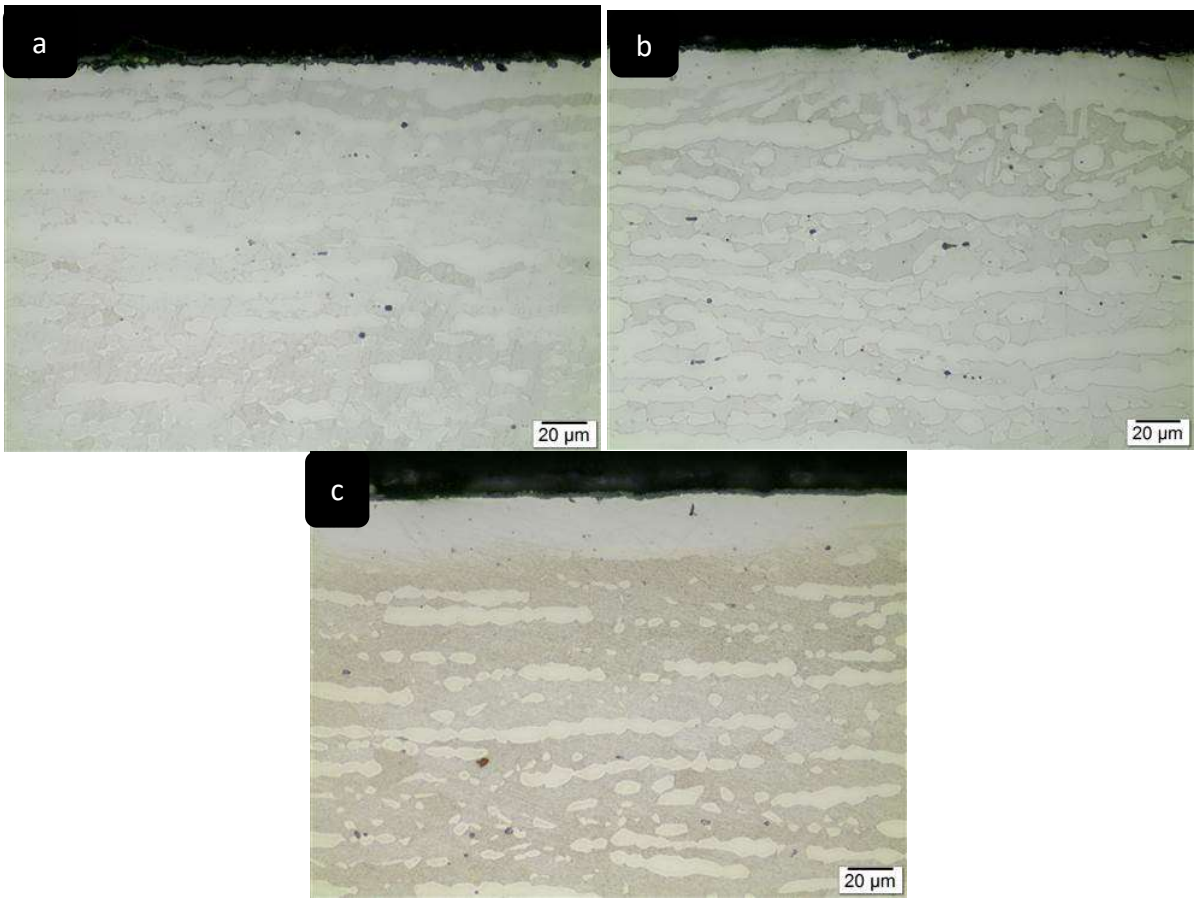


Şekil 4. İmageJ ile oluşan östenit tabakasının hesaplanması

Tablo 2. 1100 °C 1.5 bar yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonucu oluşan östenit tabakası kalınlığı

15dk	**30 dk**	**60 dk**
15,29 µm	29,89 µm	34,40 µm

Şekil 5'te 1100 °C ve 2.5 barda gerçekleştirilen yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonrası alınan boyuna kesit numunelerinin ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Oluşan östenit tabakasının kalınlığı ImageJ ile ölçülüp Tablo 3'te verilmiştir. ImageJ ile yapılan ölçüm sonrasında sürenin ve nüfuz ettirilen azot miktarının artmasıyla birlikte azota aşırı doymuş östenit tabakası kalınlığının arttığı görülmüştür.



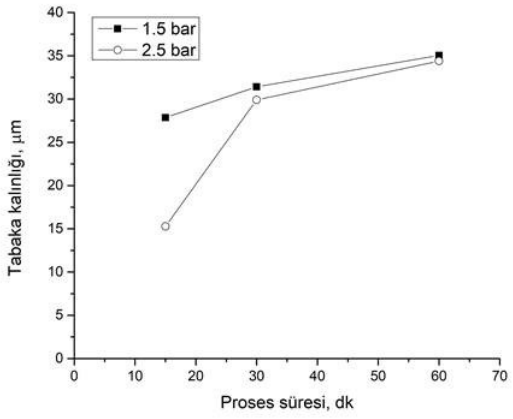
Şekil 5. 1100 °C 2.5 bar yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonrası IM görüntüleri (a-15 dk, b-30 dk, c- 60 dk)

Tablo 3. 1100 °C 2.5 bar yüksek sıcaklıkta nitrürleme sonucu oluşan östenit tabakası kalınlığı

15dk	**30 dk**	**60 dk**
27,85 µm	31,42 µm	35,04 µm

IV. TARTIŞMA

Çalışma sonucunda Şekil 6'da gösterildiği 1100 °C sıcaklıkta uygulanan HTSN işlemi sonucunda 30 dk ve 60 dk sürede basıncın etkili olmadığı gözlenmiştir. Ancak kısa süreli (15 dk) HTSN işleminde artan basınç ile daha kalın bir östenit tabakası oluşmaktadır.



Şekil 6. 1100 °C'de HTSN işlemi sonucu oluşan östenit tabakası kalınlığının işlemi süresine ve basınca bağlı değişimi

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, yüksek sıcaklıkta nitrürleme işlemi kullanılarak dubleks paslanmaz çelikte östenitik dönüşümü incelenmiştir. Dubleks paslanmaz çeliğe yüksek sıcaklıklarda nitrürleme işlemi gerçekleştirildiğinde kısa sürelerde östenitik dönüşümün artan basınçla daha yüksek olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Gunn, R. (Ed.)., *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. Woodhead publishing, 1997.

[2] Shamanth, V., Ravishankar, K. S., & Hemanth, K. (2019). *Duplex stainless steels: Effect of reversion heat treatment* (Vol. 1, p. 71). London, UK: IntechOpen, 2019.

[3] Christiansen, T. L., Villa, M., Tibollo, C., Dahl, K. V., & Somers, M. A., High temperature solution nitriding of stainless steels; current status and future trends. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, *75*(2), 69-82, 2020.

[4] Ghaderi, F., & Kheirandish, S. H. The Effect of Heat Treatment and Cold-work on Precipitation and Recrystallization of BioDur108 High Nitrogen Austenitic Stainless Steel, International Journal of ISSI, Vol. 18, No. 1, pp. 64-73, 2021.

[5] Sung, J. H., Kong, J. H., Yoo, D. K., On, H. Y., Lee, D. J., & Lee, H. W., Phase changes of the AISI 430 ferritic stainless steels after high-temperature gas nitriding and tempering heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, *489*(1-2), 38-43, 2008.

[6] Berns, H., Manufacture and application of high nitrogen steels. *ISIJ international*, *36*(7), 909-914, 1996.

[7] Wang, B., Christiansen, T. L., & Somers, M. A., Influence of ferrite-austenite distribution in 2205 duplex stainless steel on high-temperature solution nitriding behaviour. *Surface and Coatings Technology*, *453*, 129134, 2023.

[8] Padilha, A. F., Randle, V., & Machado, I. F. (1999). Microstructure and microtexture changes during solution nitriding to produce austenitic case on ferritic–austenitic duplex stainless steel. *Materials science and technology*, *15*(9), 1015-1018.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

TÜRKİYE'DE AVCILIK MEVZUATI VE AV KABAHATLERİ

Süleyman Pınar[1,2] Akif Keten[3]

[1] Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce

[2] Tarım ve Orman Bakanlığı, 4. Bölge Müdürlüğü, Muğla İl Şube Müdürlüğü, Muğla

[3] Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi, Yaban Hayatı ekolojisi ve Yönetimi Bölümü, Düzce

* **Sorumlu Yazar:** mail@mail.edu.tr

ÖZET

Geçmişte avcı toplayıcı davranış gösteren insan, günümüzde ihtiyacın yanısıra sportif amaçla da avcılık faaliyeti yapmaktadır. Tarım, ormancılık, yerleşim, ulaşım, enerji vb. faaliyetlerde olduğu gibi avcılık da doğal alanlar üzerinde baskılar oluşturmaktadır. Bu da diğer doğal kaynaklar gibi sürdürülebilir yönetim gerektirmekte ve planlı yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ulusal olarak hazırlanan kanun, yönetmelik, yönerge gibi yasal düzenlemeler hazırlanmıştır. Türkiye'de avcılıkla ilgili temel kanun 2003 yılında çıkarılan 4915 sayılı Kara Avcılığı Kanunu'dur. Kanun, yaban hayatı kaynaklarının ve biyoçeşitliliğin korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir yönetimi yetkisini Tarım ve Orman Bakanlığına vermiştir. Avcılığın kontrolü, av hayvanlarının korunması, av yasaklarının takibi ve bu Kanunun uygulanması Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğünce yapılmaktadır. Av ve yaban hayvanlarının zehirlenmesi ve bir türün yok edecek şekilde zarar verilmesi suç kapsamındadır. Bu konular haricinde kanunun belirttiği diğer yasaklara ve esaslara aykırı hareket edenlere ise kabahatler kanununa göre idari para cezaları uygulanmaktadır. Kanunun ve yaptırımların temel amacı yaban hayatının korunmasıdır.

Anahtar Kelimeler: *Kara Avcılığı Kanunu, Av Kabahatleri, Avcılık.*

THE HUNTING LEGISLATION AND HUNTING MISDEMEANORS IN TURKİYE

ABSTRACT

Humans, who were hunter-gatherers in the past, are recently engaged in hunting activities for sportive purposes as well as for feeding. As with activities such as agriculture, forestry, settlement, transportation, energy, etc., hunting also creates pressures on nature. This, like other natural resources, requires sustainable and planned management. Legal regulations such as laws, regulations and directives have been prepared nationally. The basic law on hunting in Turkey is the Land Hunting Law coded 4915 enacted in 2003. The law authorizes the Ministry of Agriculture and Forestry to protect, develop and sustainably manage wildlife resources and biodiversity. The General Directorate of Nature Conservation and National Parks is responsible for the control of hunting, the protection of game animals, the monitoring of hunting bans and the implementation of this Law. Poisoning game and wild animals and damaging them in a way that destroys a species are criminal offenses. Apart from these issues, administrative fines are imposed on those who violate other prohibitions and principles specified by the law according to the misdemeanor law. The main purpose of the law and sanctions is the protection of wildlife.

Keywords: *Land Hunting Law, Hunting Misdemeanors, Hunting*

I. GİRİŞ

İnsanlık tarihi ile birlikte başlamış olan avcılık başlarda beslenme ve hayatta kalma mücadelesinde temel bir rol oynamıştır. Avcılık insanoğlunun temel ihtiyaçlarını giderme çabası ile ortaya çıkan ve zaman içerisinde kendine özgü kuralları içinde barındıran bir faaliyettir (Cahoone, 2009). Avcılık kavramı en basit

tanımı ile bir canlının farklı amaçlar için canlı ya da ölü olarak ele geçirilmesi amacıyla gerçekleştirilen faaliyetler olarak tanımlanmaktadır (Dickson et al., 2009). İnsanlar, avcılık becerilerini evrimleştirerek basit taş aletlerden başlayarak zamanla daha sofistike silahlar kullanmaya geçtiler. Mızraklar, oklar ve bıçaklar, metal çağının başlamasıyla daha etkili hale geldi, avcılık teknikleri ve araçları çeşitlendi.

İnsanlar başlangıçta temel ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla avlanırken, zamanla kullanılan araçların evrim geçirmesi ve avcılığın sadece bir ihtiyaç değil, aynı zamanda keyif ve spor haline gelmesi, bu faaliyetin modern çağda farklı bir niteliğe bürünmesine rağmen, özünü değiştirmemiştir (Cook ve diğ., 2015).

Avcılığın gelişimi ve değişimi ile devletlerin savaş stratejileri de gelişmiştir. Türklerde avcılık sayesinde iyi nişancılar yetiştiği, avcılık sayesinde güçlü bir ordunun oluştuğu ve bu durumun devleti ve ülkeyi büyüterek sağlam tuttuğu bilinmektedir. Türklerde ordunun yetiştirilmesi için avcılık bir yetiştirme aracı sayılmış, savaşlardan önce tatbikat niteliğinde büyük sürgün avları yapılmıştır. Bu sayede güçlü düşmanlara karşı sayısız zaferler kazanılmıştır (Kayaöz, 2014).

Endüstri devrimiyle birlikte, av araçlarındaki evrim hız kazandı. Yüksek kaliteli çelik üretimi ve seri üretim, ateşli silahların ve daha sofistike av tüfeklerinin ortaya çıkmasına neden oldu. Bu, avcıların daha uzak mesafelerden ve daha etkili bir şekilde avlanmasını sağladı. Ayrıca, dürbünler, lazer teknolojisi ve izleme ekipmanları gibi modern teknolojik araçlar, avcılık deneyimini daha da geliştirdi. Antik çağlarda, avcılık lüks sınıfın özel bir tutkusu haline gelmiş ve avlanma sahaları özenle korunmuştur. Ortaçağ'da, avcılık genellikle nüfuzlu sınıfın ayrıcalıklı bir uğraşı olarak kabul edilmiştir. Osmanlı İmparatorluğu döneminde, avcılık yalnızca padişahlar ve soylular arasında yaygın bir hobi olmuş, bu durum da avlanmanın belirli kurallara tabi olduğu bir düzenin başlangıcını işaret etmiştir. (Güven ve Hergüner, 1999).

İnsanların doğa ve yaban hayvanları üzerindeki olumsuz etkileri sanayileşme başta olmak üzere, tarımsal ilaçlar, kentleşme, hava kirliliği, su kirliliği, çevre kirliliği vb. sorunlar nedeni ile yaban hayvanlarının yaşama-üreme-beslenme alanlarında ki tahribatlar yaban hayatının sürdürülebilirliliğini tehlikeye atmaktadır. Çalışmanın amacı Türkiye'deki avcılığın yönetim biçiminin açıklanmasıdır. Ayrıca, avcılık ihlalleri ve bunların cezaları hakkında bilgi vermektir. Sürdürülebilir avlanma politikalarının geliştirilmesine katkı sağlamak hedeflenmiştir.

1) Av Yönetimi ve Gerekliliği

Av kaynaklarının bir yandan korunması ve diğer yandan da çeşitli amaçlarla kullanılması, önemli bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Av kaynaklarının sürdürülebilirliği kavramına göre, av kaynakları bir yandan gelecek kuşaklara aktarılmalı diğer yandan da toplumların belli ihtiyaçlarını giderecek şekilde kullanılabilmelidir. Av kaynaklarının sürdürülebilirlğine göre, bu kaynakların koruma kullanma dengesi gözetilerek planlanması, yönetilmesi ve kullanılması anlamına gelmektedir. Av kaynaklarının kullanılması esas olarak av hayvanlarının çeşitli amaçlarla avlanmasını ifade etmektedir. Avlanmada gözetilen amaçlar ise, spor, eğlenme, talim yapma, et ihtiyacının karşılanması vb. gibi amaçlarla olabilmektedir. Avlanma, özü itibariyle av kaynaklarının ve av potansiyelinin azaltılması ve tahrip edilmesi sonucuna yol açacağından dolayı, planlı ve belli kurallara tabi olması öngörülmektedir(Güneş,2009). Doğal kaynakların sınırlı olduğu bir dünyada, diğer doğal kaynaklarda olduğu gibi avcılığında sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi

paydaşları ilgilendiren bazı kuralların getirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu kuralların temelinde kısıtlamadan ziyade yaban hayatının korunması ve avcılık faaliyetlerinin sürekliliğinin sağlanması bulunmaktadır.

Avcılık, doğal döngülerin ve ekosistemlerin bir parçasıdır, ancak kontrolsüz avlanma biyoçeşitliliği tehdit edebilir. Belirli türlerin aşırı avlanması, ekosistem dengesini bozabilir ve diğer türlerin popülasyonlarını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, av yönetimi, belirli türlerin sürdürülebilir seviyelerde avlanmasını sağlamak amacıyla uygulanan bir dizi stratejiyi içerir. Bu stratejiler içerisinde; avlanma sezonlarının, avlanma limitlerinin, avına izin verilen türlerin belirlenmesi, avlanmaya açık ve kapalı avlanma bölgelerinin belirlenmesi, avda kullanılabilecek araç ve gereçlerin belirlenmesin gibi kısıtlayıcılar sayılabilir. Av yönetimi, avcılığın sürdürülebilir ve dengeleyici bir faaliyet olarak devam etmesini sağlamak için avcılığın ekosistemlere olabilecek olumsuz etkilerini minimize etmeyi amaçlamaktadır.

2) Avcılık Yasal Düzenlemeleri Ve Tarihi Süreci

Avcılık konusunda dünyada ilk bilimsel kitabı yazdıran kişi Sultan Melikşah (Aralık 1072-Kasım 1092)'dır. Ebu Tahir Hatuni'ye; Av Hayvanlarını ve Avcılığı inceleyen "Şikar-Name"(Avcılığın Usul ve Esasları) ismi altında bir kitap yazdırmıştır (Güven ve Hergüner, 1999). Avrupada Av hukuku kapsamında av ve avcılık konusunda yapılan ilk düzenlemeler ortaçağda görülmektedir. Osmanlı hukukunda, ilk devirlerden itibaren ormanları ve av hayvanlarını koruma amacıyla emirname, yasakname, kanunnameler ve nizannameler gibi düzenlemeler yapılmıştır (Türkmen, 2013). 1882 yılında ise "Zabıta-i Saydi-i Berri ve Bahri Nizamnamesi" ilk kanun olarak kabul edilmektedir (Diktaş, 2006).

Cumhuriyet döneminde de uzun yıllar av ve yaban hayatı kaynaklarının korunması, geliştirilmesi ve avcılığın düzenlenmesine ilişkin bir yasal düzenleme yapılmamıştır. Türkiye'de yaban hayvanlarının korunması, geliştirilmesi ve kara avcılığının düzenlenmesi 5 Mayıs 1937 tarihinde yürürlüğe giren ve 2003 yılına kadar yürürlükte kalan 3167 sayılı Kara Avcılığı Kanunu kapsamında ele alınmıştır. İlk yayınlandığı tarihte reform niteliğinde yeni düzenlemeler getiren bu kanun, uzun bir süre gerektiğince uygulanamamıştır. Bu nedenle yasa, özellikle yaban hayvanlarının korunması ve geliştirilmesi için gerekli olan koşulların sağlanmasında yetersiz kalmış, usulsüz avlanmanın önlenmesinde etkili olamamıştır (Iğırcık, 2001).

Güncel Av Hukuku

Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, kanunları ve yönetmelikleri ile birlikte, uluslararası sözleşmeler çerçevesinde Paris, Ramsar, Bern, Washington (Nesli Tehlike Altında Olan Yabani Hayvan ve Bitki Türlerinin Uluslararası Ticaretine İlişkin Sözleşme-CITES), Barcelona ve Biyolojik Çeşitlilik gibi anlaşmaları içerecek şekilde, yurdumuzda av ve yaban hayvanlarının yaşam alanlarını sürdürülebilir bir şekilde koruma ve geliştirme amacını taşıyan yasal bir çerçeve oluşturmaktadır. Bu hukuki düzenleme, doğanın korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir kaynak kullanımı ve yönetimi konularını kapsar. 1956'da çıkarılan 6831 sayılı Orman Kanunu, 1983'de çıkarılan 2873 sayılı Milli Parklar Kanunu ve 2003 yılında çıkarılan 4915 sayılı Kara Avcılığı Kanunu ormanların, yaban hayatı kaynaklarının ve biyoçeşitliliğin korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir yönetimi yetkisini Tarım ve Orman Bakanlığına vermiştir (DKMP Av Yönetimi Dairesi, 2013).

4915 Sayılı Kara Avcılığı Kanununun amacı; "Sürdürülebilir av ve yaban hayatı yönetimi için av ve yaban hayvanlarının doğal yaşam ortamları ile birlikte korunmalarını, geliştirilmelerini, avlanmalarının kontrol altına alınmasını, avcılığın düzenlenmesini, av kaynaklarının millî ekonomi açısından faydalı olacak şekilde değerlendirilmesini ve ilgili kamu ve özel hukuk tüzel kişileri ile işbirliğini sağlamak" olarak tanımlanmıştır.

Kanun av ve yaban hayvanlarını ve yaşama ortamlarını, bunların korunmasını ve geliştirilmesini, av ve yaban hayatı yönetimini, avlakların kurulması, işletilmesi ve işlettirilmesini, avcılığın, av turizminin, yaban hayvanlarının üretiminin, ticaretinin düzenlenmesini, toplumun bilinçlendirilmesini, avcıların eğitimini, av ve yaban hayatına ilişkin suç ve kabahatler ile bunların takibi ve cezalarını kapsamaktadır.

Suç ve Kabahatlerin Takibi ve Cezalar

Avcılığın kontrolü, av hayvanlarının korunması, av yasaklarının takibi ve bu Kanunun uygulanması Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğünce yapılmaktadır.

Emniyet Genel Müdürlüğü, Sahil Güvenlik Komutanlığı, Jandarma Genel Komutanlığı ve Gümrükler Muhafaza Genel Müdürlüğü bünyesinde genel kolluk olarak tanımlanan görevliler ile av yasaklarının takibi ile görevli olan av koruma memurları ve saha bekçileri; Kanunda belirtilen yasaklara aykırı hareket edenleri avlanmadan men etmeye, haklarında tutanak düzenlemeye, yasaklanan fiillerin konusunu oluşturan veya bu fiillerin işlenmesi suretiyle elde edilen canlı veya cansız hayvanlara el koymaya, avlanmada kullanması veya avlaklarda, pazaryeri ve ticarethanelerde bulundurulması yasak olan eşya ve vasıtalara el koymaya, bu amaçla yakalamaya görevli ve yetkilidirdir. Görevli memurların bulunmadığı yerlerde, kır ve köy bekçileri ile köy muhtarları da aynı yetkiye sahiptir.

El konulan silahlardan kanunda belirtilen haznesi iki fişek alacak şekilde sınırlandırılmamış olan av tüfekler muhafaza altına alınmakta, mahalli mülki amirin onayı ile mülkiyetleri kamuya geçirilmekte ve kararın kesinleşmesinin ardından ihale yoluyla satışa konu edilerek Döner Sermaye işletme hesabına gelir kaydedilmektedir.

Yasaklanan av yöntemleri ile ele geçirilen hayvanlar, eğer canlıysa ve yaralı değilse hemen, yaralıysa tedavi edilerek doğal yaşam alanlarına salınmaktadır.

Av koruma ve kontrollerinde Bakanlık görevlilerine veya güvenlik güçlerine gönüllü destek sağlamak üzere "Fahri Av Müfettişlerinin Seçimi, Eğitimi, Görev Ve Yetkileri İle Çalışma Esas Ve Usullerine Dair Yönetmelik" hükümlerine uygun olarak belirlenen kişilere fahri av müfettişliği görev ve unvanı verilmekte; bu kişiler kanuna göre yasak avlanma sayılan fiilleri işleyenler hakkında işlem yapılması amacı ile tutanak düzenleyebilmektedir. (Kara Avcılığı Kanunu, 2003).

4915 Sayılı Kara Avcılığı Kanununda yukarıda belirtilen hususlar ile ilgili belirlenmiş olan idari para cezaları her yıl belirli bir oranda artırılarak uygulanmaktadır.

Toplumsal düzenin devamı açısından korunması gereken hukuki değerlerin bilerek ve istenerek ihlalini (kast) veya bu değerleri korumaya yönelik kurallara karşı özensizliği (taksir) ifade eden insan davranışı ise "suç" tur. Suç ancak kanunla düzenlenir. Suç, Türk Ceza Kanununda veya ceza hükmü içeren özel kanunlarda düzenlenen hukuka aykırı ve cezai yaptırıma bağlanmış eylemlerdir. Suç, bir haksızlıktır ancak her haksızlık suç değildir. Her suç tanımında bir hukuki değerin korunması esas alınır. Bu hukuki değerler

mal varlığı, vücut dokunulmazlığı veya ifade özgürlüğü gibi örneklendirilebilir. Bunların ihlali halinde ihlal eden ceza yaptırımı ile cezalandırılmaktadır (Adalet Bakanlığı, 2023).

Kabahat kavramı ise 5326 Sayılı Kabahatler Kanununda; "kanunun, karşılığında idarî yaptırım uygulanmasını öngördüğü haksızlık anlaşılır." olarak tanımlanmıştır. Hukuksal boyutla suç ve kabahat arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin suç işleyen bir kişinin adli sicil kaydına bu durum işlenirken, kabahatler kanununa aykırı bir fiil gerçekleştiren kişinin adli sicil kaydına işlenmemektedir. (Kabahatler Kanunu, 2005)

4915 Sayılı Kara Avcılığı Kanunu kapsamında av ve yaban hayvanlarının beslendikleri ve barındıkları ortamı zehirleyenlerin fiili suç kapsamındadır ve bu suçu işleyenler iki yıldan beş yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılmakta, faillerin avcılık belgesi iptal edilerek bir daha belge verilmemektedir. Av ve yaban hayvanlarının beslenmesine barınmasına üremesine ve korunmasına imkan veren doğal yaşama alanlarının zehirlenmesi ile avlanmak suretiyle, bir canlı türünün yok olması ya da ekolojik dengenin bozulması tehlikesine neden olunması konularıda 4915 sayılı kara avcılığı kapsamında suç kapsamına alınmış iki yıldan beş yıla kadar hapis cezasına hükmolunacağı belirtilmiştir. Bu konular haricinde kanunun belirttiği diğer yasaklara ve esaslara aykırı hareket edenlere ise her bir aykırılık için ayrı ayrı olmak üzere kabahatler kanununa göre idari para cezaları uygulanmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1- 4915 Kara Avcılığı Kanunu ve Merkez Av Komisyonu Kararlarına aykırı hareket edenler hakkında düzenlenmiş olan av kabahatleri ve 2023 yılı için geçerli olan idari para ceza tutarları

Hüküm Maddesi	**Hüküm Tanımı**	**Ceza Maddesi**	**İdari Ceza Miktarı (TL)**
4.1.1	Koruma altındaki yaban hayvanlarının avlanması,	21/1	2077,00
4.1.2	Yaban hayvanlarının üreme, tüy değiştirme ve göç dönemlerinde rahatsız edilmesi,	21/1	2077,00
4.1.3	Yaban hayvanlarının yavru ve yumurtalarının toplanması,	21/1	2077,00
4.1.4	Yaban hayvanlarının yuvalarının dağıtılması,	21/1	2077,00
4.1.5	Memelilerin kış uykusunda rahatsız edilmesi,	21/1	2077,00
4.1.6	Lüzumu halinde yaban hayvanlarının kendilerinden, yavru ve yumurtalarından korundukları süre içinde faydalanma ve zararlı olanları ile mücadele esaslarına uyulmaması,	21/1	2077,00
4.2	Koruma altında olmayan yaban hayvanlarının; avlanmanın yasaklandığı gün ve sürelerde tarım alanları, besi ve yaban hayvanlarına zarar verecek sayıda çoğalmaları, hastalık taşıdıklarının tespiti durumunda söz konusu alanlarda görevlilerce hazırlanacak rapor doğrultusunda belli sayıda avlanabilmeleri için belirlenecek esas ve usullere uyulmaması,	21/1	2077,00
4.6	YHGS deki kamuya ait açıklıkların ve mevcut olan ağaçların, bitki örtüsünün yanması, kesilmesi, sökülmesi, boğulması, budanması sonucunda oluşacak açıklıkların ve arazinin işgal edilmesi ve kullanılması,	21/1	2077,00
(5.1-5.2).1	Avlanma süreleri dışında avlanma	21/1	2077,00
(5.1-5.2).2	Avlanma miktarları dışında avlanma	21/1	2077,00
12.3	Avlanmanın açık olduğu avlaklarda; avlanmanın belli bir süre Bakanlıkça ava kapatılması yasağına uymama,	21/1	2077,00
4.4	Av ve yaban hayvanlarının beslenmesine barınmasına üremesine ve korunmasına imkan veren doğal yaşama alanlarının zehirlenmesi	21/2	iki yıldan beş yıla kadar hapis cezası

Hüküm Maddesi	Hüküm Tanımı	Ceza Maddesi	İdari Ceza Miktarı (TL)
4.5	Yaban hayatı koruma ve geliştirme sahaları ile üretme istasyonları ve benzeri sahalarda, bina ve tesislerin atıklarının arıtılmadan doğal ortama bırakılması nedeni ile yaban hayatının veya ekosistemin olumsuz yönde etkilenmesine sebebiyet verenlere ve tahrip edenlere fiilleri suç oluşturmadığı takdirde,	21/3	09.08.1983 tarihli ve 2872 sayılı Çevre Kanunu hükümleri
5.3	Av ve yaban hayatının korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir yönetiminde; kamuoyu desteğinin sağlanması için toplumun bilgilendirilmesi, bilinçlendirilmesi ile avcıların ve toplumun eğitilmesi amacıyla; Türkiye sınırları içinde yayın yapan ulusal, bölgesel, yerel radyo ve televizyonlar; av sezonunun başlamasından onbeş gün önce ve sona ermesinden itibaren de onbeş gün süreyle eğitici, uyarıcı ve tanıtıcı yayın yapmak zorundadırlar. Bu yayın ve tanıtım faaliyetleri her kuruluşun ana haber bültenlerinden sonraki kuşakta ve ücretsiz olarak yayınlanır. Bu programların süresi yılda toplam üç saatten az olamaz. Bu hizmetlerin yürütülmesinde kurum ve kuruluşlar Bakanlık ile işbirliği yaparlar.	21/6	13.04.1994 tarihli ve 3984 sayılı Radyo ve Televizyonların Kuruluş ve Yayınları Hakkında Kanun hükümleri uygulanır.
21/7	Avlanmak suretiyle, bir canlı türünün yok olması ya da ekolojik dengenin bozulması tehlikesine neden olunması halinde,	21/7	İki yıldan beş yıla kadar hapis cezası
11	Özel avlakların kuruluş amaçları dışında işletilmesi,	22	12.653,00
12	Avlaklarda izin almadan avlanma ve MAK Komisyonunca avlanmaya yasaklanan avlaklarda avlanma,	23	2077,00
12.2	Özel kanunlarla avlanmanın yasaklandığı sahalar ile 2 nci maddenin 11, 12 ve 13 üncü bentlerinde tanımlanan saha ve istasyonlarda avlanmak.	23	3660,00
6.2.1	Haznesi iki fişek alacak şekilde sınırlandırılmamış otomatik, yarı otomatik, pompalı vb yivsiz av tüfekleri ile avlanmak, havalı tüfek ve tabancayla avlanmak,	24/1	1535,00
6.2.2	MAK tarafından belirlenecekler dışında kara, hava ve yüzer araçlarla avlanmak,	24/1	1535,00
6.2.3	MAK tarafından belirlenecekler dışında ses, manyetik dalga, ışık yayan araç gereçlerle avlanma	24/1	1535,00
6.2.4	Canlı mühre ile avlanmak	24/1	1535,00
6.2.5	Tuzak, kapan vb araçlarla avlanmak	24/1	1535,00
6.2.6	Diğer	24/1	1535,00
6.2.7	MAK Kararı ile avda kullanılması yasaklanan araç ve gereçlerin avlaklarda bulundurulması, pazar ve ticarethanelerde satış yasağına uyulmaması	24/1	1535,00
6.2.8	Özellikleri MAK ca belirlenenlerin dışında güme kurulması ve bu gümelerde avlanılması	24/1	1535,00
6.2.9	Zehirle avlanmak	24/2	Bir yıldan üç yıla kadar hapis ve elli günden az olmamak üzere adli para cezası
6.3	Avlanan hayvanların taşınması ve avlanma gayesi dışında mücadele kapsamında ve kişilerin kendilerini, tarlalarını ve sürülerini korumak maksadıyla avlaklarda avcılık belgesi ve avlanma izni olmadan avlanmada kullanılan silâhları ve araçları taşıma veya köpek bulundurma ile eğitilmiş hayvanlarla ve avlanma zamanı dışında avlanma esasları Merkez Av Komisyonunca tespit edilir. Bu esas ve usullere aykırı şekilde avlanmak.	24/1	1535,00
14.2.1	Avlaklarda, avlanma izni almadan avlanmak.	24/3	1535,00

Hüküm Maddesi	Hüküm Tanımı	Ceza Maddesi	İdari Ceza Miktarı (TL)
14.2.2	Avlaklarda, avcılık belgesi olmadan avlanmak.	24/3	3134,00
14.2.3	Avcılık belgesi ve avlanma izin belgesini yanında bulundurmadan avlanmak	24/5	169,00
13.4	Yabancı avcılık belgesi veya geçici avcılık belgesi almadan avlanmak, (Yabancı Avcılar)	24/4	10531,00
15.1.1	Av turizmi izin belgesi almadan av turu, fotoğraf ve film çekimleri ile av ve yaban hayvanları gözlem turları yaptıran veya yabancıların geçici avcılık belgesi olmadan avlanmasına aracılık etme(av turizmi seyahat acenteleri, kişi ve kuruluşlar)	25	105.688,00
15.1.2	Geçici avcılık belgesinde kayıtlı türler ve yerler dışında avlanma (yabancılar)	25	52.827,00
18.1	Taraf olunan uluslararası sözleşmelerle ticareti yasaklanan yerli ve yabancı yaban hayvanları ve bu Kanunun 6 ncı maddesi çerçevesinde belirlenen avlanma esas ve usullerine aykırı olarak avlanan yaban hayvanları canlı veya cansız olarak veya bunların et, yumurta, deri, post, boynuz ve benzeri parçaları ile bunların türevleri satmak, satın almak nakletmek ve bunların ithalatı ve ihracatı yapmak,	26/1	5252,00-26.390,00
18.2	Taraf olunan uluslararası sözleşmelerle ticaretine düzenleme getirilen türler ile bu Kanun kapsamında yasal olarak avlanan av hayvanları ve bunlardan elde edilen parçalarının ticaretini denetlemeye ve kısmen veya tamamen yasaklamaya, bunların ticaretinden Döner Sermaye İşletmesine gelir alınması ile ilgili usul ve esaslara uymama,	26/1	5252,00-26.390,00
19	Kamu kurum ve kuruluşları ile gerçek ve tüzel kişiler, av ve yaban hayvanlarından Türkiye'de doğal olarak yetişen türleri Bakanlıktan izin almak şartıyla üretebilirler. Bunların doğaya salınabilmesi için Bakanlıktan ayrıca izin almak zorundadır. Yabancı türlerden Türkiye'nin uluslararası yükümlülükleri çerçevesinde ve doğal türlerimize zarar vermeyecek olanlarının ithalatına ve üretimine, ilgili kurum ve kuruluşların görüşleri alınarak Bakanlıkça izin verilebilir.	26/1	5252,00-26.390,00
18.3	Yurt içinde sergilenmek üzere veya gösteri amaçlı olarak uluslararası sözleşmeler çerçevesinde ithalatına Bakanlıkça izin verilen yaban hayvanları satmak	26/1	31.680,00
21/5	FAM'ların bu Kanunda yazılı Suçları İşlemeleri	Bütün cezalar	Cezalar İki Misli Uygulanır. (İdari Para Cezası Dahil)

SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuç olarak, Türkiye'deki avcılık yönetimi, av kaynaklarının sürdürülebilirliği ve ekosistem koruma hedefleri doğrultusunda etkin bir şekilde düzenlenmesi için 4915 Sayılı Kara Avcılığı Kanunu aracılığıyla önemli bir yasal çerçeve oluşturmuştur. Bu kanun, avcılık faaliyetlerini düzenleyerek sürdürülebilir avlanmayı desteklemekte ve ekosistem dengesinin korunmasına katkı sağlamaktadır.

Avcılığın tarih boyunca nasıl evrimleştiği ve toplum üzerindeki etkileri ile geleneksel avcılıktan endüstri devrimine, teknolojinin rolünden avlanmanın sosyal ve kültürel yönlerine kadar geniş bir perspektif bu

çalışmada ele alınmıştır. Bu süreç avcılığın sadece bir ihtiyaç olmanın ötesine geçerek bir spor, eğlence ve kültürel bir faaliyet haline gelmesini göstermektedir.

Türkiye'nin avcılık yönetimindeki mevcut zorluklara ve fırsatlara dikkat çekmek, sürdürülebilir avcılığın önündeki engelleri anlamak ve bu konuda etkili çözümler geliştirmek gerekmektedir. Sürdürülebilir avlanma politikalarının uygulanması ve toplumun bu konuda bilinçlendirilmesi, yaban hayatının ve doğal kaynakların korunmasına yönelik önemli adımlar olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Adalet Bakanlığı (2023) "Suç Nedir?" https://magdurbilgi adalet gov tr. [Ziyaret tarihi: 21 Aralık 2023]
[2] Cahoone, L , (2009) Hunting as a moral good Environmental Values, 18(1): 67-89
[3] Cook, M A , Chitwood, M C , Palmer, D , DePerno, C S , Gross, K , (2015) Evaluating deer hunters' support for hunting deer with dogs Human Dimensions of Wildlife, 20(2): 174-181
[4] Dickson, B , Hutton, J , Adams, W M , (2009) Recreational Hunting, Conservation and Rural Livelihoods: Science and Practice Blackwell Publishing Ltd ISBN: 978-1-405-16785-7
[5] Diktaş, D 2006 "Kara Avcılığı Kanununun Uygulanmasından Kaynaklanan Hukuksal Sorunlar" İ Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
[6] DKMP Av Yönetimi Dairesi (2013) "Türkiye'de Av ve Yaban Hayatı" https://www tarimorman gov tr [Ziyaret tarihi: 21 Aralık 2023]
[7] Güneş, Y (2009) Av ve Yaban Hayatına Karşı İşlenen Suçlar ve Kabahatler: Mukayeseli Hukuka Dayanan Bir Analiz Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 59 (2), 15-29
[8] Güven, Ö , Hergüner, G (1999) Türk Kültüründe Avcılığın Temel Dayanakları. Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi , 5 (5) , 32-49
[9] Iğırcık, M (2001) Türkiye'nin Av Potansiyelinin Geliştirilmesine İlişkin Sosyo Ekonomi Çözümleme Yayımlanmamış doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
[10] Kabahatler Kanuınu (2005) https://www mevzuat gov tr/mevzuatmetin/1 5 5326 pdf adresinden 21 Aralık 2023 tarihinde alınmıştır
[11] Kara Avcılığı Kanunu (2003) https://www mevzuat gov tr/mevzuatmetin/1 5 4915 pdf adresinden 21 Aralık 2023 tarihinde alınmıştır
[12] Kayaöz, E "Avcılık, Tarihi ve Etiği", içinde SÜRDÜRÜLEBİLİR AVCILIK Temel Eğitim Kitabı, 1 baskı, Ankara, (2014), ss 1–31
[13] Sulak Alanların Korunması Yönetmeliği (2014) https://www mevzuat gov tr/ [Ziyaret tarihi: 21 Aralık 2023]
[14] Yalınkılıç, Y Türkleş, M Uyanık, ve C Acar (2009), "Sürdürülebilir Avcılık ve Uygulamalar", ACTA Turc Çevrimiçi Temat Türkoloji Derg , sayı 1, ss 367–391
[15] Türkmen, M N (2013) , "Osmanlı'da Av Kültürü" İstanbul: Bilge Kültür Sanat Yayınları

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM SÜREÇLERİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Şuayip ELDEMİR[a], Oğuz ERDEM[b]

[a] Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale/Türkiye.
[b] Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar: suayipeldemirr@gmail.com**

ÖZET

Son yıllarda gelişen teknolojiyle artan yeni tür malzeme talepleri mühendisleri farklı özelliklere sahip malzemeler keşfetmeye zorlamaktadır. Bu yeni nesil malzemelerin istenen özelliklerde geliştirilerek daha ekonomik yöntemlerle imal edilmesi ve endüstriyel alanlarda kullanılması amacıyla yapılan çalışmalarda ciddi artışlar görülmektedir. Günümüzde mühendislerinin en çok üzerinde durdukları konuların başında, hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerden ham madde üretilmesi ve imalat sanayinde kullanılması gelmektedir. Bu bağlamda, alüminyum köpükler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek darbe sönümleme kapasitesi ve ısı-ses yalıtımı özellikleri nedeniyle birçok sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum köpük üretim yöntemlerinin en başında toz metalurjisi gelmektedir. Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemleriyle (toz veya elyaf sinterleme tekniği, gaz hapsetme tekniği, çamur hazırlama tekniği ve boşluk tutucu madde kullanma tekniği) alüminyum köpük üretme süreçleri ve üretim parametreleri (köpürtücü madde cinsi ve miktarı, köpürtme süresi, köpürtme sıcaklığı, köpürtücü maddenin karışma hızı ve süresi) üzerine detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, alüminyum köpüklerin endüstriyel uygulamaları hakkında da detaylı örnekler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, köpürtücü ajan, köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, toz metalurjisi

ALUMINUM FOAM PRODUCTION PROCESSES BY POWDER METALLURGY METHOD AND ITS INDUSTRIAL APPLICATIONS

Şuayip ELDEMİR[a], Oğuz ERDEM[b]

[a] Kırıkkale Üniversitesi, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering, Kırıkkale/Türkiye.
[b] Kırıkkale Üniversitesi, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering, Kırıkkale/Türkiye.
[*] **Corresponding Author: suayipeldemirr@gmail.com**

ABSTRACT

In recent years, increasing demands for new types of materials with developing technology force engineers to discover materials with different properties. There is a significant increase in the work done to develop these new generation materials with the desired properties, to manufacture them with more economical methods and to use them in industrial areas. Today, one of the most important issues that engineers focus on is the production of raw materials from light and high-strength materials and their use in the manufacturing industry. In this context, aluminum foams have begun to be used in many sectors due to their low density, high impact damping capacity and heat-sound insulation properties. Powder metallurgy is the leading aluminum foam production method. In this study, detailed information is given on aluminum foam production processes using powder metallurgy methods (powder or fiber sintering technique, gas trapping technique, sludge preparation technique and space retention technique) and the production parameters (foaming agent type and amount, foaming time, foaming temperature, mixing speed and duration of the foaming agent). Moreover, detailed examples of industrial applications of aluminum foams are given.

Keywords: Aluminum foam, foaming agent, foaming temperature, foaming time, powder metallurgy

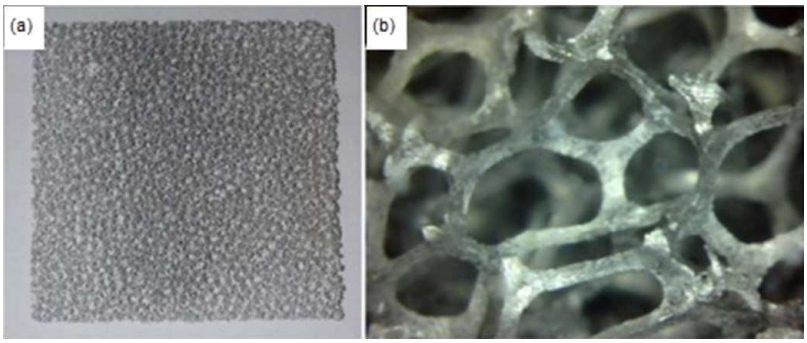
I. GİRİŞ

Doğada ahşap, mantar, bitkiler, kemiklerde gözenekli yapılar diğer bir deyişle boşluklu yapılar görülebilmektedir. Bu yapılar hafifliklerinin yanı sıra yüksek ağırlık/mukavemet kapasiteleri bakımından öne çıkmaktadırlar [1]. Bu yapılardan esinlenilerek son yıllarda metalik köpükler mühendislik uygulamalarında çok sık kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum ise mühendislik uygulamalarında kolay erişilebilirlik, yüksek korozyon direnci, hafiflik ve yüksek süneklilik özellikleriyle oldukça fazla tercih edilmektedir [2]. Alüminyum köpükler görünümleri itibariyle metalik süngerimsi yapılar olarak tanımlanabilir. Alüminyum köpükler; enerji sönümleme, elektromanyetik koruma, ısı eşanjörleri/yalıtımları, ses izolatörleri gibi özellikleri sebebiyle havacılık, otomotiv, petrokimya ve inşaat gibi sektörlerde uygulama alanları bulmaktadır [3]. Alüminyum köpük malzemeler doğa kendiliğinde oluşmazlar. Üretilmeleri için çeşitli imalat aşamalarından geçmelidirler. Alüminyum köpüklerin çeşitli üretim yöntemleri Tablo-1'de şematize edilmiştir [4], [5].

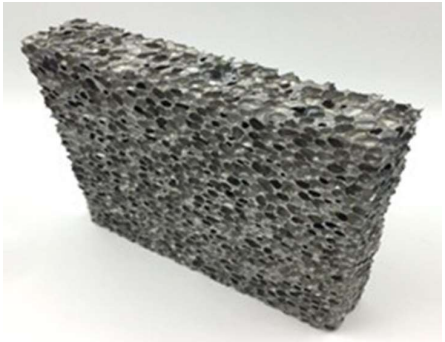
Tablo1. Alüminyum köpük üretim yöntemlerinin sınıflandırılması [4]-[6]

Alüminyum Köpük Üretim Yöntemleri			
Sıvı Metal	Toz Metal	Metal İyonları	Metal Buharı
Gaz ile köpürtme	Gaz hapsetme	Elektro-kimyasal depozisyon	Buhar depozisyonu
Ajan ile köpürtme	Çamur hazırlama		
Katı-Gaz ötektik katılaştırma	Toz sinterleme		
Basınçlı toz ergitme	Boşluk tutucularla sıkıştırma		
Döküm	İçi boş metal toplarını sinterleme		
Sprey oluşturma	Polimer metal bileşiklerinin ekstrüzyonu		
	Reaksiyon sinterleme		

Alüminyum köpükler şekilsel olarak açık ve kapalı hücreli köpükler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Şekil 1'de açık hücreli bir alüminyum köpük yapı, Şekil 2'de ise kapalı hücreli alüminyum köpük yapı görülmektedir.



Şekil 1. Açık hücreli alüminyum köpük: a) 10 ppi ve %95,5 gözenekliliğe sahip açık hücreli alüminyum köpük ve b) 100 kat büyütülmüş hali [7]



Şekil 2. Kapalı hücreli alüminyum köpük [8]

Literatürde alüminyum köpüklerin üretimiyle ilgili yapılmış birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Movahedi ve arkadaşları döküm yolu ile Al-A356 alaşımlı alüminyum köpükler imal etmişlerdir. Çalışmalarında üretilen alüminyum köpüğü plazma elektrolitik oksidasyon kullanarak yaklaşık 22µm kalınlıkta seramik oksit (SiO_3) ile kaplayarak korozyon dayanımını araştırmışlardır. Deneyler sonucunda seramik oksitle kaplanmış numunelerin kaplanmamış numunelere göre daha yüksek korozyon dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir [9]. Han ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, açık hücreli alüminyum köpük numunelerin duvarındaki ikincil gözenekleri ortaya çıkarmışlardır. Daha sonra bu numuneleri basınç testine tabi tutmuşlar ve ikincil gözenekleri ortaya çıkarılan açık hücreli alüminyum köpüğün elastik modülünün ve akma mukavemetinin, ikincil gözenekleri ortaya çıkarılmamış olana göre arttığını tespit etmişlerdir [10]. Devivier ve arkadaşları, açık hücreli alüminyum köpüğü elektrokimyasal çökeltme yöntemiyle nikel ve bakır ile kaplayarak enerji sönümleme kapasitelerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda nikel kaplı alüminyum köpüğün, bakır kaplı alüminyum köpükle kıyaslandığında enerji absorbe kapasitesi ve rijitlik gibi mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [11]. Benzer şekilde, Wichianrat ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında, parçacık takviyeli kompozit alüminyum köpük imal ederek mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Takviye parçacık olarak SiC seramik tozu kullanılan alüminyum kompozit köpüğün basınç dayanımının, enerji absorbe etme miktarının ve mikrosertliğinin SiC takviye hacim oranı ile doğru orantılı olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Hangai ve arkadaşları, deforme olmuş alüminyum köpük numunesinin yeniden köpürtülmesi için denemeler yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada, yapısal olarak bozulan alüminyum köpük numuneleri sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) kullanarak yoğunlaştırıp daha sonra köpürtme için ısıl işleme tabi tutmuşlardır. Çalışmalar sonucunda SKK kullanılarak yoğunlaştırılmış numunelerin yeniden köpüklenebildiği ve gözeneklilik durumunun deforme olmadan önceki hali ile neredeyse benzer olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, SKK kullanılmayan numunelerde köpükleşmenin istenen düzeyde olmadığını ve gözeneklilik durumunun ise düşük olduğunu tespit etmişlerdir [13]. Duarte ve arkadaşları, borular içerine alüminyum köpük dolguları yaparak boruların eğilme mukavemetlerini incelemişlerdir. Yerinde doldurulan köpük dolgulu boruların bükülme yükleri altında daha stabil ve tahmin edilebilir mekanik performans gösterdiğini fakat, dış ortamda doldurma işleminin daha yüksek yükleme hızı sağladığını gözlemlemişlerdir [14]. Gabora ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada SiC parçacıkları bulunan alüminyum köpük malzeme kullanarak farklı imalat yöntemleriyle (torna, freze, testere ile kesme, su jeti ile kesme) numuneler üreterek kesme konikliği ve takım aşınmalarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarından su jeti ile kesmede koniklik değerinin %3'e kadar saptandığını, tornalama işlemlerinde yüksek hız çeliği ve karbür kesici takımlarının aşındığını, frezelemede alüminyumun takıma sıvandığını ve kesme işleminde ise tam paralelliğin sağlanamadığını tespit etmişlerdir [15].

Garai ve arkadaşları, alüminyum köpük dolgulu ürünlerin otomotiv sanayisindeki uygulama alanlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında farklı yoğunluklara sahip alüminyum dolgu malzemelerine ve bunları dolgu yapmak için farklı üretim yöntemlerine odaklanmışlardır. Deneysel çalışmalarda 250 kg/m^3, 500 kg/m^3 ve 750 kg/m^3 yoğunluğa sahip alüminyum köpüklere üç farklı birleştirme tekniği: ısıl genleşme ile birleştirme, mekanik sıkıştırma ve yapıştırma yöntemlerini denemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan yapıştırma yöntemiyle birleştirmenin bükülme yükü altında en iyi yük taşıma kapasitesine, ısıl genleşme yöntemiyle birleştirmenin maksimum eğilme deplasmanına sahip olduğunu ve mekanik sıkıştırma yöntemiyle ile doldurulan numunelerin de enerji sönümleme yeteneklerinin diğer yöntemlere nazaran daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir [16]. Asadipanah ve arkadaşları, mikrodalga sinterleme yöntemiyle %5 ila %15 oranları arasında değişen ZrB_2 takviyeli alüminyum köpük numuneler üretmişler ve ürettikleri numunelerin sertlik ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, 63 HV sertlik ve 270 MPa basınç dayanımı ile %10'luk takviye oranına sahip alüminyum köpük numunenin en iyi sonuç değerlerini verdiğini tespit etmişlerdir [17]. Yine, Dineshkumar ve arkadaşları literatürde alüminyum köpüklerin sertlik değerleri üzerine yapılmış çalışmaları çok kapsamlı bir şekilde ele alarak derlemişlerdir. Genel olarak sertlik değerinin alüminyum köpük içerisine yapılan seramik takviyelerle artırılabileceği sonucuna varmışlardır [18].

Cambronero ve arkadaşları geleneksel ısıtma yöntemlerinin aksine güneş enerjisiyle çalışan güneş fırını kullanarak toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum köpük imal etmişlerdir. Çalışmalarında paslanmaz çelik bir silindir kalıp içerisinde bulunan Al-Si alaşım tozlarını konsantre güneş ışınları yardımıyla ısıtmışlardır. Güneş fırınının perde açıklıkları kontrol ederek sabit ısıyı sağlamışlardır. Deneysel çalışma sonuçlarından 300 W/cm^2'lik konsantre güneş ışını ve 200 saniyelik fırınlama süresi sonunda tam köpürmenin sağlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, kalıp tasarımına bağlı olarak fonksiyonel tip derecelendirilmiş bir köpük üretmeninde mümkün olduğunu bildirmişlerdir [19]. Orovčík ve arkadaşları, TiH2 köpürtücünün ön

ısıtma işleminin alüminyum köpük üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarına göre TiH2 ön ısıtma işlemi daha az H2 gazı salınımına ve gecikmiş köpürme sayesinde iç köpük yapısında iyileşmeye yol açtığını bildirmişleridir. Bu iyileşmeyle birlikte çökme sertleşmesinde %20 ve enerji sönümleme yeteneğinde ise %30 artış sağlandığını tespit etmişlerdir [20].

Geramipour ve arkadaşları, CaCO3 köpürtücü ajan ile toz sıkıştırma tekniği kullanarak ergitme yolu vasıtasıyla alüminyum köpükler imal etmişlerdir. Sıkıştırma basıncını 127-318 MPa, köpürtücü ajan miktarını da toplam kütlenin %15'i kadar alarak oluşturdukları numunelerde lineer genleşme, basınç dayanımı ve yoğunlaşma gerilmesinde artış olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre optimum köpürtme sıcaklığını 900 ˚C ve köpürtme süresini de 10 dakika olarak tespit etmişlerdir [21]. Yang ve arkadaşları, yer/boşluk tutucu yöntemi ile alüminyum köpük üretmişlerdir. Gözenekliliği %50, %60 ve %70 olan alüminyum köpüklerin basma-yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, gözenekliliğin artmasıyla yorulma mukavemetlerinin de doğrusal olarak azaldığını tespit etmişlerdir [22].

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ana malzeme olarak AlSi10Mg ile TiH2 (Titanyum hidrür) ve ZrH2 (Çinko hidrür) köpürtücü ajanlar kullanarak yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemiyle alüminyum köpük üretmişlerdir. Bu ajanlarla bileşik oluşturan alüminyum alaşım tozu Al3Ti ve Al3Zr parçacıklarını oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Al3Ti parçacıkları Al3Zr parçacığına göre daha küresel olduğu için Al3Ti parçacıklar çevresindeki gerilimin daha düşük olduğunu ve kusur oranının daha az gerçekleştiğini keşfetmişlerdir. 1100 W lazer çıkış gücü kullanıldığında TiH2 ve ZrH2 köpürtücü ajan kullanılan numunelerde sırasıyla %20,61 ve %28,73'lük maksimum gözeneklilik oranı tespit etmişlerdir. Ayrıca, Ti ve Zr parçacıkları hidrojen, azot ve oksijen gazları tarafından kırılganlaştırıldıkları için alüminyum köpüklerde yüksek sertlik değerleri elde edildiğini bildirmişlerdir [23]. Shukla ve arkadaşları, alüminyum içi boş küre kullanarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yüzey bozunma davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında küre içeriğini %5 ila %50 hacim oranları arasında değiştirmişlerdir. Sinterleme basıncını ise 250 MPa olarak sabit tutmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda aşınma direncinin %30 hacim kürecik oranına kadar arttığını sonrasında ise azaldığını tespit etmişlerdir [24]. Su ve arkadaşları çalışmalarında, sismik izolatörlerde kapalı hücre alüminyum köpük kullanımını denemişlerdir. Çalışmanın deneysel olup analitik olarak test edilmesi gerektiğini de ayrıca vurgulamışlardır. Deney sonuçlarından alüminyum köpük kullanımı ile tünel cidarının dinamik tepkisinin azaltılabileceği ve şok emme tabakasının ivme tepkisinin de azaltabileceğini tespit etmişlerdir [25]. Benzer şekilde, Xu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, farklı gözenek yapısına sahip alüminyum köpüklerin elektro manyetik parazit (EMI) üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda 130-1800 MHz frekans aralığında 25-75 dB ses seviyesi arasında EMI koruma performansını tespit etmişlerdir. Deneylere göre EMI koruma performansı gözenek arttıkça artmakta ve frekans yükseldikçe düşmekte olduğunu bildirmişlerdir. En iyi korumanın %75,61 ila %93,08 gözeneklilik oranları arasında olduğu sonucuna varmışlardır [26].

Bu çalışmada, literatürde var olan çalışmalar ele alınarak toz metalurjisi yöntemleriyle alüminyum köpük üretim süreçleri, üretim parametreleri ve alüminyum köpüklerin endüstriyel uygulamaları hakkında kapsamlı bilgiler verilmiştir.

II. ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİNDE KULLANILAN TOZ METALURJİSİ TEKNİKLERİ

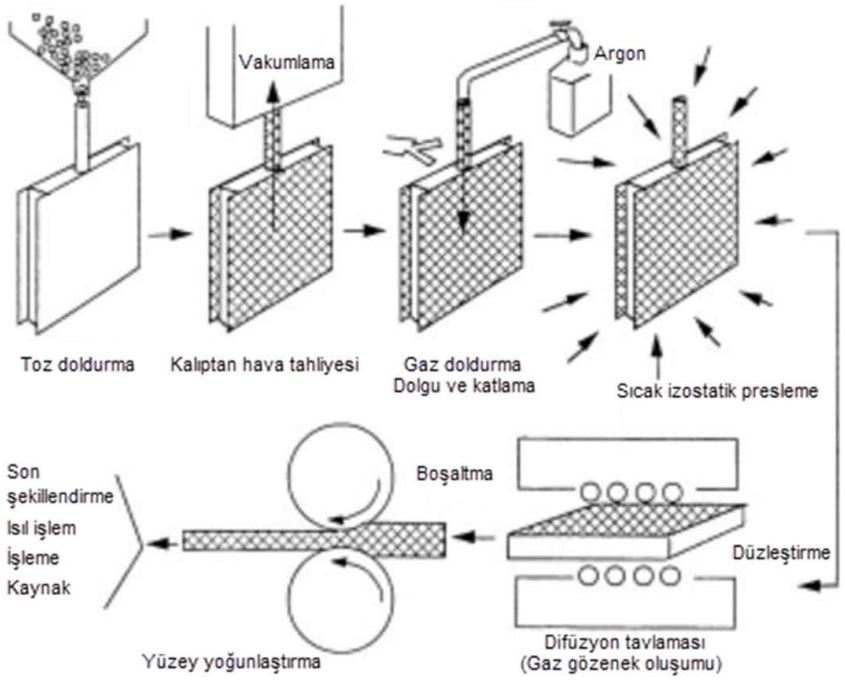
A. Tozlarının veya Elyaflarının Sinterlenmesi Tekniği

Alüminyum alaşımlı toz veya granüllerden gözenekli/süngerimsi metal köpükler üretmek taneciklerin sinterlenmesini engelleyen oksit tabakası sebebiyle daha zordur [27]. Bu durumu aşmak için oksit tabakasını kırmak ve tanecikler arasında metalik bağ oluşumunu sağlamak için presleme sırasında toz karışımını deforme etmek gerekir [28]. Ayrıca, alternatif olarak, sinterleme sırasında 595-625 °C'de düşük ergitmeli ötektik alaşım oluşturan silikon, magnezyum veya bakır tozları gibi sinterleme yardımcıları kullanılabilir. Alüminyum tozlar yerine alüminyum lifleri kullanmak köpük alüminyum ürünler yapmak için daha uygun olabilmektedir [29].

B. Gaz Hapsetme Tekniği

Bu işlemde öncelikle alüminyum tozları havası alınmış kalıplara doldurulur. Daha sonra içerisine 3-5 atm basınçta argon gazı enjekte edilir. Kalıp izostatik bir biçimde preslenir ve bu sırada yapı yoğunlaşır, ergime

gerçekleşmez. Basınç altında gazdan kaynaklı gözenekler oluşur. Daha sonra tavlama işlemi gerçekleştirilir. Tavlama işlemi genellikle ergime sıcaklığı noktasının %60'nda ve 6-24 saat sürede yapılır [29]. Tavlama esnasında gözenekler büyür ve yaklaşık 10-100 μm arasındadır. Elde edilen ürün prosese uygun şekilde biçimlendirilir. Şekil 3'te gaz hapsetme tekniği şematik olarak gösterilmiştir [30]-[32].



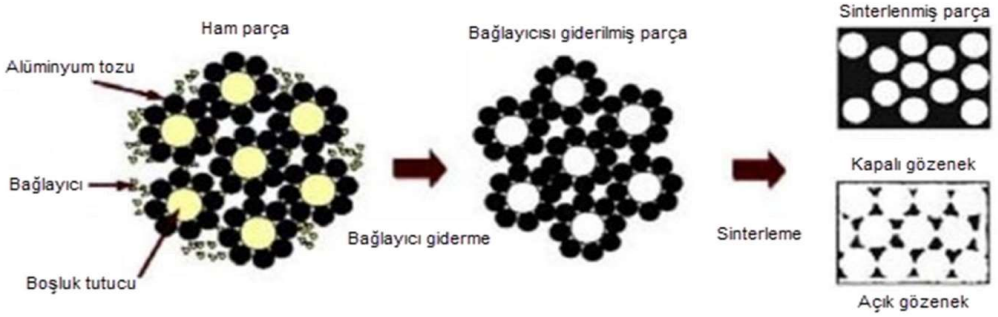
Şekil 3. Gaz hapsetme tekniğinin şematik gösterimi [30]

C. Çamur Hazırlama Tekniği

Alüminyum tozları, köpürtücü maddelerden (Magnezyum Hidroksit ($Mg(OH)_2$), Magnezyum Karbonat ($MgCO_3$), Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$), Kalsiyum Karbonat ($CaCO_3$), Titanyum Hidrür (TiH_2), Çinko Hidrür (ZrH_2), Magnezyum Hidrür (MgH_2)) ve bazı reaktif katlı maddelerinden oluşan toz bulamacı ya da çamuru karıştırılır. Burada seçilen ajanların seçimindeki en kritik aşama buharlaşma sıcaklığıdır. Çamur ısıtılır ve gaz oluşumu sağlanır ve gazla birlikte kontrollü bir genişleme gerçekleşir. Çamur tamamen kuruduktan sonra sinterlenir [29], [33]. Fosforik asit ile alüminyum hidroksit veya hidroklorik asit kabarıcı madde olarak kullanılarak alüminyum köpükleri üretilmiş olur. Fakat, üretilen ürünlerde yetersiz mukavemet ve yapıda çatlaklar kaçınılmazdır [29], [34].

D. Boşluk Tutucu Madde Kullanma Tekniği

Bu yöntemde boşluk tutucu madde etrafına ergimiş alüminyum enjeksiyonuna benzer bir durum vardır. Boşluk tutucu malzemelerin etrafına alüminyum tozu konur. Burada boşluk tutucu malzeme olarak seramik parçacıklar, içi boş küreler, polimer parçacıklar veya tuzlar kullanılabilir. Alüminyum tozları boşluk tutucu malzeme etrafına dolgu malzemesi ya da bağlayıcı ile tutturulur. Daha sonra presleme işlemi yapılır. Yer tutucular ısıya dayanıklı ise bu presleme sıcak yapılır. Gerekli ham mukavemet sağlandıktan sonra boşluk tutucu malzeme yapıdan uzaklaştırılır ve ürün sinterlenir [29], [35].



Şekil 4. Boşluk tutucu malzeme tekniğiyle alüminyum köpük üretiminin şematik gösterimi [35]

III. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM PARAMETRELERİ

A. Köpürtme Süresi

Toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum köpük üretiminde köpürtücü maddenin köpürtme sıcaklığında bekletilmesi kritik önem arz etmektedir. Düzgün ve kabul edilebilir bir alüminyum köpük için köpürtme süresinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Geramipour ve arkadaşları, $CaCO_3$ köpürtücü ajan kullanarak farklı ajan katkı oranlarında (%5, %10, %15 ve %20), farklı sıkıştırma basınçlarında (127, 191, 255 ve 318 MPa), farklı köpürtme sıcaklıklarında (800, 900 ve 1000 ˚C) ve farklı köpürtme sürelerinde (15, 25 ve 30 dakika) alüminyum köpükler üreterek mekanik özellikler ve gözenek dağılımlarını araştırmışlardır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre; diğer tüm üretim parametreleri aynı iken 10 dakikadan az ve 25 dakikadan fazla köpürme sürelerinde alüminyum köpük yapıların içerisinde $CaCO_3$'ün yeterince ayrışmaması ve hücrelerin çökmesi nedeniyle basınç dayanımlarında düşme gözlemlemişlerdir. Yine, diğer tüm üretim parametreleri aynı iken 10-25 dakika arasında yapılan köpürtme sürelerinde alüminyum köpük yapılarda 40,5 – 45 MPa arasında basma dayanımları elde etmişlerdir [36].

B. Köpürtme Sıcaklığı

Köpürtücü ajanlar belirli sıcaklıklarda ayrışarak gaz oluşumu sağlarlar. TiH_2 toz maddesi de alüminyum tozları karışımı içerisinde 400 ˚C'de ayrışmaya başlar ve 800 ˚C'lere kadar ayrışma devam eder [37], [38]. Çinici ve arkadaşları, alüminyum tozu karışımı içerisinde köpürtücü madde olarak %0,8 oranında TiH_2 tozu kullanarak köpürtme sıcaklıklarını 650, 670, 690, 710 ve 730 ˚C olacak şekilde değiştirerek alüminyum köpükler üretip darbe davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda köpürtme sıcaklığı arttıkça köpük yoğunluğunun azaldığını ve darbe sönümleme enerjisinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda en ideal alüminyum köpük yapı için optimum köpürtme sıcaklığını 710 ˚C olarak tespit etmişlerdir [39].

Köpürtücü maddelerin cinsine göre köpürtme sıcaklıkları değişkenlik göstermektedir. Örneğin; $CaCO_3$ ajanının kullanımında genellikle köpürtme işlemi 680 ˚C'de yapılır. ZrH_2 köpürtücü ajanı kullanarak alüminyum köpük üretimlerinde 720 ˚C köpürtme işlemi gerçekleştirilir [36], [40]. Bunun yanı sıra, üretim yöntemlerine göre de köpürtme sıcaklıkları değişkenlik göstermektedir. Alüminyum köpük üretiminde ajanlı üretim yöntemlerinden biri de Formgrip yöntemidir. Bu yöntemde köpürtme sıcaklığı 620 ˚C'de yapılmaktadır [41], [42]. Ayrıca, bir diğer önemli yöntem olan Alporas yönteminde ise köpürtme işlemi 680 ˚C'de yapılır [29], [42].

C. Köpürtücü Madde Cinsi ve Katkı Miktarı

Köpürtücü madde olarak TiH_2, ZrH_2 ve $CaCO_3$ endüstride oldukça sık kullanılmaktadır. Bu maddeler alaşımın ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda kimyasal ayrışmaya uğrayarak gaz çıkışına sebep olurlar. Çıkan gazlar köpürmeyi başlatır. Bu bağlamda köpürtücü madde cinsi ve katkı miktarı önemlidir. Köpürtücüler genel olarak ağırlıkça %0,6 oranlarında yapıya katılırlar [29], [43], [44]. Li ve arkadaşları, ağırlıkça %0,6 ila %1,4 arasında değişen oranlarda ZrH_2 köpürtücü ajanı kullanarak farklı köpürtme sıcaklıkları (660-740 ˚C) ve farklı köpürtme sürelerinde (1,5-4 dakika) alüminyum köpükler üreterek gözenek yapılarını araştırmışlardır. Diğer tüm üretim parametreleri aynı iken köpürtücü ajanın katkı oranının artmasıyla birlikte gözeneklilik oranının ve gözenek çapının arttığını tespit etmişlerdir. En iyi alüminyum köpük yapı için ajan katkı oranını ağırlıkça %0,8 olarak belirlemişlerdir [45].

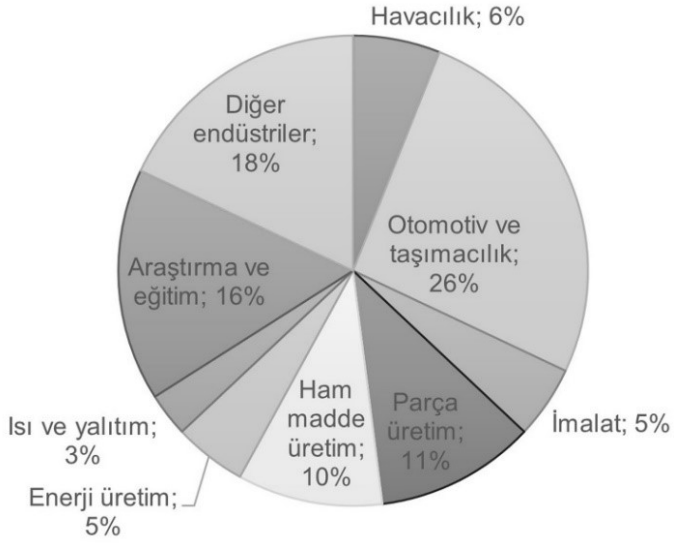
D. Köpürtücü Maddenin Karışma Hızı ve Süresi

Toz metalurjisi yöntemleriyle üretilen alüminyum köpüklerde, üretim başlangıcındaki toz malzemelerin homojen şekilde karışması büyük önem arz etmektedir. Köpük ana metali ile köpürtücü maddelerin toz halde (katkı fazda) birbirleriyle homojen şekilde karışması nihai ürünün kalitesini doğrudan etkilemektedir [39]. Mirzaei-Solhi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0,5 ila %2 arasında değişen oranlarda $CaCO_3$ tozu ve alüminyum tozlarını farklı karıştırma süreleri (0,5-2,5 dakika) ve farklı karıştırma hızlarında (700, 1400 ve 2000 rpm) tek eksenli karıştırıcılarda homojen şekilde karıştırıp alüminyum köpükler üretmişlerdir. Üretim aşamalarında köpürtme sıcaklığını 700 ˚C ve köpürtme süresi ise 10 dakika olarak ayarlamışlardır. Çalışmanın sonuçlarından, $CaCO_3$ katkı miktarının ağırlıkça %2'ye artırılması ve karıştırma hızının 2000 rpm'de tutulmasıyla gözenekliliğin arttığını, hücre boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en iyi alüminyum köpük yapının ağırlıkça %1 $CaCO_3$ katkı oranı ve 1400 rpm karıştırma hızı parametreleriyle elde edildiğini tespit etmişlerdir. Bu değerlerle üretilen alüminyum

köpüklerde küresel hücre yapısına, 8 MPa basınç dayanımına, 0,9 g/cm^3 yoğunluğa ve 1,12 kJ enerji sönümleme kapasitesine ulaştıklarını belirtmişlerdir [46].

IV. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

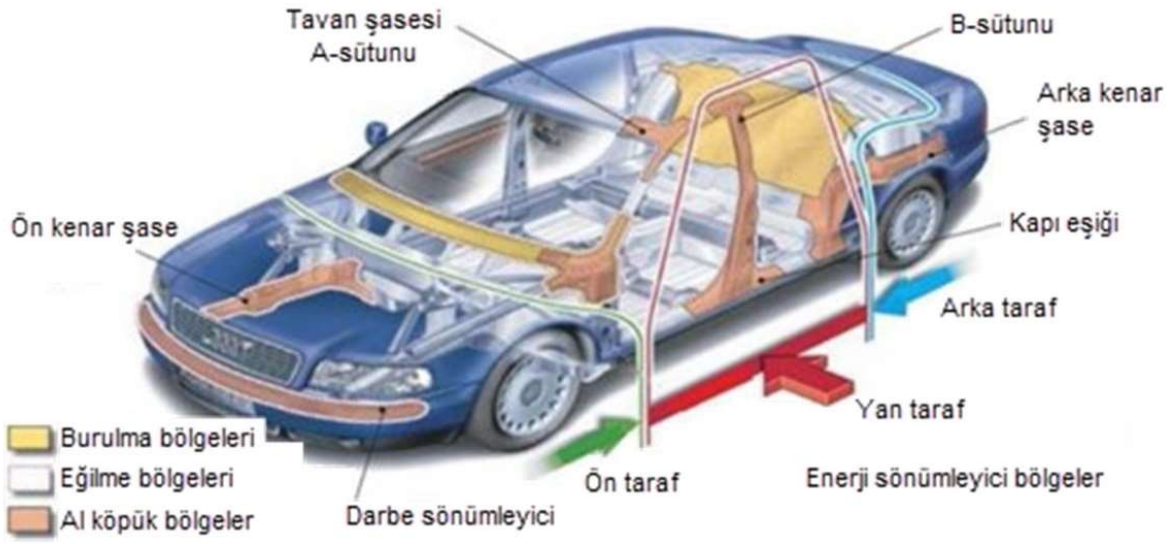
Alüminyum köpükler otomotiv, uzay ve uçak sanayi, demiryolu, tersane, inşaat ve biyomedikal gibi sektörlerde kullanılmaktadır [29]. Şekil 5'te alüminyum köpüklerin endüstrideki uygulama alanlarının yüzdelik dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 5. Alüminyum köpüklerin endüstrideki uygulama alanlarının yüzdelik dağılımları [47]

A. Otomotiv Sanayi

Sıkılaşan emisyon kuralları ve artan yakıt maliyetleri nedeniyle üreticiler daha az yakıt tüketen araçlar üretmeye mecbur kalmışlardır. Yakıt sarfiyatının önemli bir kısmını da araç ağırlığı oluşturmaktadır. Günümüz otomobillerinde hafiflik ve sağlamlık bir arada bulunmalıdır. Bu da metalik köpüklerin özellikle de alüminyum köpüklerin kullanımını ihtiyaç haline getirmiştir. Özellikle otomobilin darbe sönümlemesi gereken; kapı, tampon, A, B ve C sütunları, motor ve şanzıman kulakları gibi noktalarda alüminyum köpükler dolgu malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 6'da bir otomobil şasesinde alüminyum köpük kullanılan bölgeler ve Şekil 7'de ise alüminyum köpük dolgulu motor kulağı görülmektedir [6], [29], [48], [49].



Şekil 6. Otomobillerde alüminyum köpük kullanım yerleri [50]



Şekil 7. LKR Ranshofen firması tarafından BMW için üretilmiş motor kulağı, soldan sağa; içi boş parça, içi alüminyum köpük doldurulmuş parça ve tam kesit alınmış alüminyum köpük dolgulu parça [6], [51]

B. Havacılık ve Uzay Sanayi

Otomotiv sektörü ile aynı ihtiyaçlar doğrultusunda (hafiflik ve dayanıklılık) havacılık sanayisinde de alüminyum köpükler kullanılması kaçınılmaz olmuştur. ABD'li Boeing firması uçak kanatlarında titanyum köpükleri, helikopter kuyruklarında ise alüminyum köpükleri kullanmaktadır. Uzay sanayisinde ise sızdırmazlık ve yalıtım istenen yerlerde alüminyum köpük kullanımı görülmektedir. Ayrıca, Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda göstermektedir ki alüminyum köpükler elektromanyetik parazitlere karşı da kullanılabilme potansiyeli olan ürünlerdir [29], [26]. Yine, alüminyum köpüklerin kullanılabilirliğinin test edilmesi ve diğer parçalara uyarlanabilmesi imkanının araştırılması amacıyla Eurocopter firması EC135 helikopterlerinin basamaklarında alüminyum köpükler kullanmıştır (Şekil 8) [52].



Şekil 8. EC135 helikopteri ve açılır alüminyum köpük basamağı [52]

C. Demiryolları

Şehir içlerinde bulunan tramvay ve hafif raylı sistemlerin araçlarla çarpışma vb. durumları için alüminyum köpükler kullanılmaktadır [29]. Ayrıca, Çin'de demiryolu tünellerinin şok emici astarlarında da alüminyum köpükler kullanılmaktadır (Şekil 9) [25].



Şekil 9. Demir yolları alüminyum köpük şok emicileri [25]

D. İnşaat Sektörü

Alüminyum köpükler inşaat sektöründe dekoratif amaçlı uygulanmasının yanı sıra enerji sönümleme kabiliyetleriyle de yapıya sağlamlık katmaktadırlar. Aleve dayanıklı yüzeylerde ve beton tapalar etrafında lokal konumlandırılan alüminyum köpükler betona tutunmakta iyi bir alternatif sağlamaktadır [29].

V. SONUÇ

Alüminyum köpükler görünümleri itibariyle metalik süngerimsi yapılardır. Bu malzemelerin üretilmesinde ağırlıklı olarak toz metalurjisi yöntemleri kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum köpük üretiminde temel olarak; alüminyum tozları köpürtücü madde (TiH_2, ZrH_2 ve $CaCO_3$) tozlarıyla katı fazda homojen bir şekilde karıştırılarak alüminyumun ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılırlar. Köpürtücü madde kimyasal ayrışmaya uğrayarak gaz çıkışına sebep olur. Çıkan gazlar köpürtmeyi başlatır. Bu çalışmada, toz metalurji yöntemleriyle alüminyum köpük üretim süreçleri, üretim parametreleri ve endüstriyel uygulama alanları kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
Seramik oksitle (SiO_3) kaplanmış alüminyum köpük numunelerin kaplanmamış numunelere göre daha yüksek korozyon dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Nikel kaplı alüminyum köpüğün, bakır kaplı alüminyum köpükle kıyaslandığında enerji sönümleme kapasitesi ve rijitlik gibi mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür. SiC seramik tozu takviyeli alüminyum kompozit köpüğün basınç dayanımının, enerji sönümleme miktarının ve mikrosertliğinin SiC takviye hacim oranı ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Deforme olmuş alüminyum köpüklerin sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) kullanılarak yoğunlaştırılıp yeniden köpüklenebildiği ve gözeneklilik durumunun deforme olmadan önceki hali ile neredeyse benzer olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel ısıtma yöntemlerinin aksine güneş enerjisiyle çalışan güneş fırını kullanarak toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum köpüklerin imal edilebileceği görülmüştür. Sismik izolatörlerde kapalı hücreli alüminyum köpük kullanımının var olduğu görülmüştür. Farklı gözenek yapısına sahip alüminyum köpüklerin elektro manyetik parazit (EMI) üzerine etkilerinin de farklı olduğu ve EMI koruma performansı gözenek arttıkça arttığı ve frekans yükseldikçe düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, son yıllarda alüminyum köpüklerin otomotiv, uzay ve uçak sanayi, demiryolu, tersane, inşaat ve biyomedikal gibi sektörlerde çok geniş uygulama alanlarına sahip oldukları tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] X. Zheng, H. Lee, TH Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, EB Duoss, JD Kuntz, MM Biener, Q.Ge , JA Jackson, SO Kucheyev, NX Fang, CM Spadaccini, Bilim 344 (2014) 1373–1377.
[2] A. Inoue, H. Kimura, Mater. Bilim. Müh. A 286 (2000) 1–10.
[3] Wan, T., Liu, Y., Zhou, C., Chen, X., Li, Y., 2021, Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review, *Journal of Materials Science , Technology*, 62
[4] Secundus G. P. (n.d.). *The Natural History. New York, NY: Penguin Classics.*

[5] Ongunyurt, B. (2019), *İndüksiyon Sinterleme Tekniği Kullanılarak Açık Hücreli 6061 Alaşımlı Köpüklerin Üretimi ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.*
[6] Eldemir, Ş., Erdem, O., 2023, Metalik Köpükler ve Uygulama Alanları, *Internatıonal Journal Of New Horızons In The Scıences (Jıhscı*), Volume: 1, Issue: 2
[7] Saw, L.H., Ye, Y., Yew, M.C., Chong, W.T., Yew, M.K., Ching T., 2017, Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system, Applied Energy 204, 1489–1499
[8] URL: https://www.metalfoamweb.com/aluminum-foam/closed-cell-aluminum-foam/
[9] Movahedi, N., Habibolahzadeh, A. (2016). Effect of plasma electrolytic oxidation treatment on corrosion behavior of closed-cell Al-A356 alloy foam. Materials Letters, 164, pp. 558-561.
[10] Han, F., Cheng, H., Wang, J., Wang, Q. (2004). Effect of pore combination on the mechanical properties of an open cell aluminium foam. Scripta Materialia, 50(1), 13-17.
[11] Devivier, C., Tagliaferri, V., Trovalusci, F., Ucciardello, N. (2015). Mechanical characterization of open cell aluminium foams reinforced by nickel electro-deposition. Materials, Design, 86, 272-278.
[12] Wichianrat, E., Boonyongmaneerat, Y., Asavavisithchai, S., 2012, Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* 22(7):1674–1679
[13] Hangai Y., Takagi T., Koyoma S., Suzuki R., 2023, Refoaming of deformed aluminum foam fabricated by precursor foaming process using remaining foaming agent and densification using friction stir welding, Materials Letters, 351.
[14] Duarte, M. Vesenjak, L. Krstulovic-Opara, I. Anzel, J.M.F. Ferreira,Manufacturing and bending behaviour of in situ foam-filled aluminium alloy tubes, Mater. Des. 66 (2015) 532–544.
[15] A. Gabora, T. Mankovits, G. Kalacska, Metal foam specimen production problems focusing mechanical tests, Mech. Eng. Letts.: R And D: Res. Dev. 18 (2019) 43–49, 7.
[16] Garai F., Beres G., Weltsch Z., 2020, Development of tubes filled with aluminium foams for lightweight vehicle manufacturing, Materials Science , Engineering A 790.
[17] Asadipanah Z., Rajabi J.M., 2015, Production of Al–ZrB2 nano-composites by microwave sintering process, Mater Sci: Mater Electron. 26, 6148–6156.
[18] J. Dineshkumar, T. Jesudas, R. Elayaraja, 2021, Materials Today: Proceedings 42, 1773–1776
[19] Cambronero L.E.G., Canadas I., Martinez D., Ruiz-Roman J.M., 2010, Foaming of aluminium–silicon alloy using concentrated solar energy, Solar Energy 84, 879–887.
[20] Orovčík, L., Nosko, M., Švec Sr. P., Nagy S., Čavojský, M., Simančík, F., Jerz, J., 2015, Effect of the TiH2 pre-treatment on the energy absorption ability of 6061 aluminium alloy foam, Materials Letters 148,82–85
[21] Geramıpour, T., Oveisi H., 2016, Effects of foaming parameters on microstructure and compressive properties of aluminum foams produced by powder metallurgy method, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 27, 1569-1579
[22] Yang, X., Hu, Q., Du, J., Song, H., Zou T., Sha J., He, C., Zhao N., 2019, Compression fatigue properties of open-cell aluminum foams fabricated by space-holder method, İnternational Journal of Fatigue, 121, 272-280.
[23] Kim, H.J., Lee, K., Shin G., Shim D.S., 2023, Fabrication of aluminum (AlSi10Mg) matrix particle (Ti and Zr) reinforced composite foam using directed energy deposition, Optic, Laser Technology, 167, 109806.
[24] Shukla, A.K., Mondal D.P., Madapana D., Majumdar, J.D., 2023, Surface degradation behavior of aluminium cenosphere composite foam developed by powder metallurgy route, Materials Chemistry and Physics 295, 127107
[25] Su, L., Liu H., Yao, G., Zhang J., 2019, Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel, Soil Dynamics and Earth Quake Engineering 119, 331-345.
[26] Xu, Z., Hao, H., 2014, Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity, Journal of Alloys and Compounds 617, 207–213
[27] Lotze G, Stephani G, Budach P, Albracht F, Schneider K. Proc. 1998 PM World Congress. European Powder MetallurgyAssociation. vol. 5, 1998. p. 195 [see also p. 259].
[28] Andersen O, Stephani G. Metal Powder Report 1999;54:30.
[29] Banhart J., Progress in Materials Science 46 (2001) 559–632
[30] Martin RL, Lederich RJ. Metal Powder Report, October 1992, p. 30.
[31] ElzeyDM, WadleyHNG. Acter Mater 2001; 49:849.
[32] Queheillalt DT, Choi BW, Schwartz DS, WadleyHNG. Metallurgical and Materials Transactions
[33] Kulkarni SB, Ramakrishnan P. Int J Powder Met 1973;9:41.
[34] Drolet JP. Int J Powder Met 1977; 13:223.
[35] Manonukul, A., Muenya, N., Léaux, F., Amaranan, S. 2010. Effects of replacing metal powder with powder space holder on metal foam produced by metal injection moulding. Journal of Materials Processing Technology, 210(3): 529–535.
[36] Geramipour T., Oveisi, H., 2017, Effects of foaming parameters on microstructure and compressive properties of aluminum foams produced by powder metallurgy method, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 27, 1569-1579
[37] Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., Fiechter, S., Görke, O., Wanderka, N. 2006. Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture. Acta Materialia, 54(7): 1887-1900.
[38] Kadoi, K., Babcsán, N., Nakae, H. 2009. Heat treatment of TiH2 powder to control decomposition phenomenon for aluminum foam fabrication by melt route. Materials Transactions, 50(4): 727-733.
[39] Çinici, H., Gökmen, U., Uzun, A., Karakoç, H., Göde, C., Türker, M., 2014, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Alsi7 Köpüklerin Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışının İncelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University Cilt 29, No 2, 395-400, 2014 Vol 29, No 2, 395-400
[40] M. Taherishargh, E. Linul, S. Broxtermann, T. Fiedler, The mechanical properties of expanded perlite-aluminium syntactic foam at elevated temperatures. J. Alloys Compd. 737, 590–596 (2018).
[41] Korner, C., Singer, R. F., ''Foaming Processes for Al'', Handbook of Cellular Metals, Degischer H.P. And Kriszt B., Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim 8-14 (2002)
[42] Gergely, V., ve Clyne, B., "The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors", Advanced Engineering Materials, 4: 175–178 (2000).
[43] Gergely, V., Curran, D.C., Clyne, T.W. ''The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors'', Composites Science and Technology, 63: 2301–2310 (2003).
[44] Duarte, I., Banhart, J., ''A Study Of Aluminium Foam Formation Kinetics And Microstructure'', Acta Materialia, 48: 2349–2362 (2000).

[45] LI D., LI J., LI T., SUN T., ZHANG X., YAO G., 2011, Preparation and characterization of aluminum foams with ZrH2 as foaming agent, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 21, 346-352*
[46] Mirzaei-Solhi, A., Allafi-Khalil, J., Yusefi, M., Yazdani, M., Mohammadzadeh, A., 2018, Fabrication of aluminum foams by using CaCO3 foaming agent, Materials Research Express 5(9), DOI:10.1088/2053-1591/aad88a
[47] Degischer, H.-P. and B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications, (2002), Wiley-vch Weinheim.
[48] Banhart, J., Metal foams: Production and Stability, Advanced Engineering Materials, 8,9 (2006) 781-794.
[49] Çinici, H., Toz Metalürjisi Yöntemi Ile Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2004) 12-24.
[50] Ashby, Michael F and Evans, Tony and Fleck, Norman A andHutchinson, JW and Wadley, HNG and Gibson, LJ, Metal Foams: a Design Guide (2000) Elsevier.
[51] Banhart, J. (2005), "Aluminium foams for lighter vehicles", *Int. J. Vehicle Design, 37: 114–125.*
[52] Schultz O., Schindler, R., Alumınıum Foam: A New Materıal For Helıcopters, Eurocopter Deutschland GmbH, Munich, Germany.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Tasarım Yönteminin Dairesel Kesitli Salyangoza Sahip Bir Pompanın Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Ayhan Nazmi İlikan

TÜBİTAK, Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Motor ve Aktarma Sistemleri Grubu, Kocaeli/Türkiye.
Sorumlu Yazar: ayhan.ilikan@tubitak.gov.tr

ÖZET

Bu çalışmada santrifüj tipte bir pompanın salyangoz kısmı içerisindeki akışın kontrolü için literatürde bulunan salyangoz tasarım yöntemleri uygulanmış, sonuçların pompa ve salyangoz performansına etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında özgül hızı 19 olan pompa çarkı ve salyangozu tasarlanmış olup, tasarım sırasında ticari bir pompanın verileri referans alınmıştır. Akışkan olarak atmosferik koşullarda su kullanılmıştır. Daha sonra HAD yöntemi kullanılarak pompa karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Çözüm ağı hücre büyüklüklerinin sonuca etkisi incelenerek sonucun çözüm ağından bağımsız olması sağlanmıştır. Çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar referans olarak seçilen pompanın katalog değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra, diğer tüm parametreler sabit tutularak salyangoz tasarımı için kullanılan yaygın yöntemlerden Pfleiderer, Stepanoff ve doğrusal çap artış yöntemleri seçilerek salyangoz tasarımı değiştirilmiştir. Pompa salyangozu içerisinde çevresel yönde akışın salyangoz girişinden çıkışına değişimi detaylı bir biçimde incelenerek uygulanan salyangoz tasarım yöntemleri karşılaştırılmıştır. Pompa çalışma bölgesi boyunca her üç yöntem de birbirine yakın verim ve basma yüksekliği sonuçları vermiştir. Tasarım debisine yakın ve bir miktar üzerindeki bölgelerde Stepanoff yöntemi en yüksek, doğrusal çap artış yöntemi ise en düşük verimi göstermiştir. Düşük debilerde ise, yine doğrusal çap artış yöntemi en düşük verimi vermiş, en iyi verimi ise Pfleiderer yöntemi göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *HAD, Pompa, Salyangoz, Santrifüj, Verim*

Effects of Design Method on the Performance of a Pump with a Volute Having a Circular Cross-Section

ABSTRACT

In this study, the design methods found in the literature for controlling the flow within the volute of a centrifugal pump were applied, and the effects of the results on the pump and volute performance were investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Initially, an impeller and volute with a specific speed of 19 were designed, referencing a commercial pump's data. Water under atmospheric conditions served as the fluid. Subsequently, pump characteristic curves were derived using CFD. Mesh cell sizes were analyzed to ensure result independence, and outcomes were compared with the reference pump's catalog values. Keeping parameters constant, common methods like Pfleiderer, Stepanoff, and linear radius progression were employed for volute design modifications. The detailed examination of circumferential flow change within the pump volute, from inlet to outlet, was conducted, and the applied design methods were compared. Throughout the pump's operational spectrum, all three methods yielded comparable efficiency and head results. Near the design flow rate, Stepanoff exhibited the highest efficiency, while the linear diameter increase method demonstrated the lowest. At lower flow rates, the linear diameter increase method showed the lowest efficiency, with the Pfleiderer method indicating the highest.

Keywords: *Centrifugal, CFD, Efficiency, Pump, Volute*

I. GİRİŞ

Salyangoz tasarımı, merkezkaç pompaların performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini etkileyen kritik bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Salyangozun karmaşık geometrisi ve konfigürasyonu, akışı yönlendirmede, basınç kayıplarını en aza indirmede ve pompa işletimini optimize etmede önemli bir rol oynamaktadır. Geçtiğimiz yıllarda bilgisayarların kapasite ve hızlarının giderek artması neticesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerinin popülerleşmesi, pompa çarkı ve salyangozu içerisindeki akışın daha iyi analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Neticede, literatürde yer alan teorik ve ampirik tasarım yöntemleri HAD yöntemleriyle entegre olmuştur. HAD yöntemlerinin tasarım sürecine entegrasyonu, pompa ve salyangoz optimizasyonuna olan yaklaşımı devrim niteliğinde değiştirmiştir. Salyangoz geometrisi içindeki akışkan davranışını modelleyerek, akış koşullarını görselleştirme, hız vektörleri, türbülans ve basınç değişimleri gibi alanları tanımlama ve nihayetinde performansı artırmak için tasarımı iyileştirme imkanı sağlamıştır. Gelişmiş hesaplama teknikleri ile geleneksel mühendislik prensipleri arasındaki bu sinerji, turbomakina teknolojisinde dikkate değer ilerlemelere yol açmış, daha verimli ve güvenilir sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Literatürde HAD yöntemi sayesinde pompa karakteristiklerinin elde edildiği ve pompa çarkı ile salyangozunun içerisindeki akışın detaylıca incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır [1], [2]. Santrifüj pompa ve kompresör salyangozları içerisindeki akışın incelendiği doktora tezinde [3], salyangoz içerisindeki kesit alanlarının çevresel yönde değişimi, kesit şekli, salyangoz dilinin geometrisi ve salyangozun radyal pozisyonunun salyangoz performansı üzerinde en önemli tasarım parametreleri olduğu belirtilmiştir. Santrifüj kompresör ve fanlar üzerinde yaptığı HAD çalışmasında [4], geleneksel yöntemle tasarlanmış bir turboşarjırın salyangozun dil bölgesindeki akış alnı genişletilerek tasarım dışı koşullarda akışta iyileştirme sağlanmıştır. Pompa salyangozlarındaki basınç kayıplarının pompa içerisindeki toplam basınç kayıplarının kayda değer bir kısmını oluşturduğunun belirtildiği çalışmada [5], salyangoz tasarımının bu nedenle kritik olduğu belirtilmiştir. Salyangoz boğaz alanı, kesit alanı şekli, spiral gelişim yöntemi ve salyangoz dili ile çark arasındaki boşluğun sayısal olarak çalışıldığı makalede, yüksek boğaz alanının pompa verimini daha yüksek debilere taşıyarak yüksek verim bölgesini genişlettiği görülmüştür. Ayrıca en iyi verimin dairesel kesitli salyangoz ile elde edildiği, spiral gelişiminde sabit açısal momentumun en yüksek verim, sabit hız yaklaşımının ise çok az altında bir verim sağladığı belirtilmiştir. Radyal boşluğun optimum değeri ise çalışmada pompa çarkının 0.053 katı olduğu görülmüştür. Başka bir sayısal çalışmada ise hem tasarım debisi hem de diğer çalışma debilerine odaklanılmış ve tasarım debisinde optimum sonucu veren salyangoz tasarım yönteminin tasarım dışı koşullarda en kötü sonucu verebileceği ve çark üzerindeki radyal kuvveti arttırabileceği gözlenmiştir [6]. Tamamen farklı tasarım debisi ve basma yüksekliğine sahip olan üç farklı santrifüj pompanın tasarlandığı bir diğer çalışmada [7], salyangozu oluşturan kesitlerin çevrelerinin uzunluklarının ve salyangoz giriş genişliğinin önemli geometrik parametreler olduğu, özellikle kesit çevre uzunluklarını düşürmenin verimi arttırmada daha etkili olduğu bildirilmiştir.

Bu araştırmada, sıklıkla kullanılan salyangoz tasarım yöntemlerinden olan Pfleiderer [8], Stepanoff [9] ve doğrusal çap artış yöntemlerinin santrifüj bir su pompasının performansına etkileri HAD simülasyonları vasıtasıyla incelenmiştir. Özgül hızı 19 olan bir pompa çarkı ve salyangozu tasarlandıktan sonra karakteristik eğrisi elde edilmiş ve model doğrulanmıştır. Daha sonra salyangoz tasarım yöntemi değiştirilerek tekrar karakteristikler elde edilmiştir. Yalnızca salyangozun içerisindeki basınç değişimi ve kayıpların incelenmesi amacıyla benzer akışkan giriş koşulları altında çarkın bulunmadığı, yalnızca salyangoz geometrisinin modellendiği durum için de simülasyonlar gerçekleştirilmişi böylece çark-salyangoz etkileşiminin etkisi de incelenebilmiştir. Sonuçlar pompa karakteristik eğrileri ile salyangoz kesiti üzerinde çizdirilen konturlar vasıtasıyla incelenmiş ve tartışılmıştır.

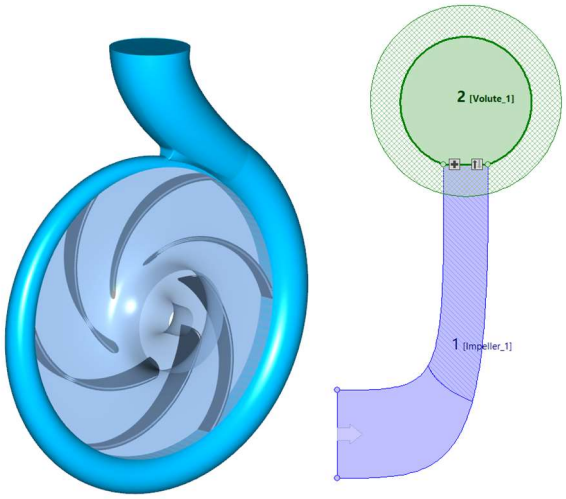
II. REFERANS POMPA TASARIMI VE DOĞRULAMA

Özgül hızı 19 olan santrifüj tipte ticari bir pompa katalogdan belirlenmiş ve karakteristik eğrisi, emme ve basma flanş çapları, çark çapı gibi büyüklükleri yine katalogdan elde edilmiştir. İlgili ticari pompaya ait veriler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Katalogdan seçilen pompanın özellikleri

Parametre	Değer
n	1450 d/d
Q	122 m^3/h
H	33.4 m
P_m	14.9 kW
η	% 74.3
D_e	DN100
D_b	DN80
$D_ç$	328 mm

Tablo 1'de yer alan değerler, bu çalışmanın esasını oluşturan pompanın tasarımı için hedeflenmiştir. CFturbo [10] yazılımı içerisine hedeflenen debi, basma yüksekliği ve devir sayısı gibi değerler tanımlanarak geleneksel bir turbomakina tasarım adımları yazılım içerisinde izlenmiştir. Zira, yazılım, literatürde yer alan turbomakina tasarım adım ve yöntemlerinin oldukça pratik bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır. Meridyenel geometrinin oluşturulmasından, kanat açı ve profil yapılarına, salyangoz tasarımından çıkış flanşına kadar kullanıcıya ilgili parametreleri değiştirme olanağı vermektedir. Kullanıcı dilerse literatür bilgisine dayalı hesaplamalara dayalı olan programın varsayılan önerileri ile de devam ederek tasarımı gerçekleştirebilmektedir. Bu yönleriyle çok hızlı bir şekilde tasarım gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada temel amaç katalog pompası ile birebir aynı pompayı tasarlamak olmadığı için bir optimizasyon çalışması yürütülmemiştir. Pompa katalog değerlerinden elde edilen bilgiler yazılıma tanımlanmış, diğer değerler yazılımın önerisi ile belirlenmiştir. Salyangoz tasarımı için doğrulama çalışması sırasında Pfleiderer yöntemi tercih edilmiştir. Elde edilen pompa çark ve salyangozuna ait görüntüler Şekil 1'de yer almaktadır.



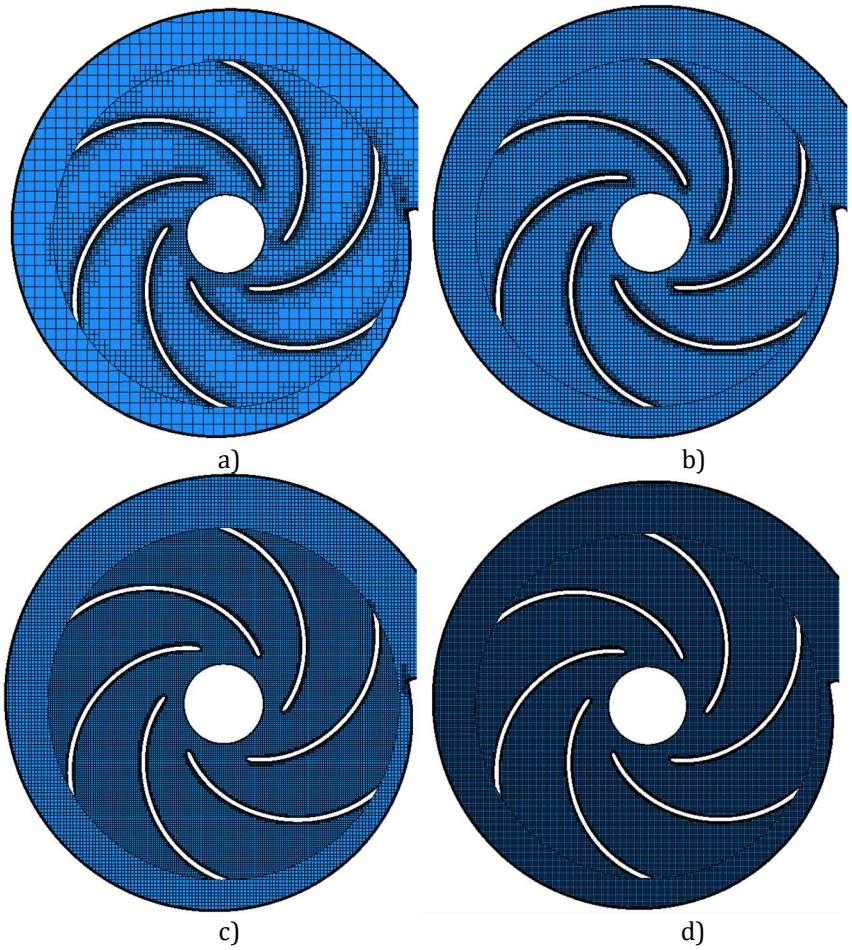
Şekil. 1 CFturbo yazılımı ile tasarlanan pompanın görüntüleri

Pompa çark ve salyangozunun tasarlanmasından sonra ilk olarak, doğrulama amacıyla, tasarlanan pompanın performansının referans alınan pompanın performansı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla sonlu hacimler yöntemi kullanan ticari STAR-CCM+ [11] yazılımı kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Pompa çark ve salyangozu içerisindeki akış üç boyutlu, zamandan bağımsız, türbülanslı, sıkıştırılamaz şekilde modellenmiştir. Akışkan olarak atmosferik koşullardaki su kullanılmıştır. Çark ve salyangoz bölgeleri içerisindeki akış hacimleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. "Moving reference frame" yöntemi kullanılarak çark akış hacminin salyangoz akış hacmine göre çark devir sayısı kadar bir hızla bağıl dönüş hareketi sağlanmıştır. Çark ve salyangoz arasındaki ortak yüzey ise arayüzey (interface) şeklinde tanımlanmıştır. Pompa giriş yüzeyine kütlesel debi sınır koşulu uygulanmış ve pompa performans eğrisini elde edebilmek amacıyla her analizde değeri değiştirilmiştir. Salyangoz çıkışına ise bütün analizlerde atmosferik basınç sınır koşulu uygulanmıştır. Çark yüzeyleri çark hızı ile aynı hızda dönen hareketli duvar, diğer yüzeyler ise kaymama koşulunu sağlayan sabit duvar şeklinde tanımlanmıştır. Türbülans modeli olarak STAR-CCM+ yazılımının önerdiği k-ε Realizable modeli seçilmiştir. Katı yüzeylerin yakınındaki sınır tabaka akışının doğru modellenmesi için seçilen türbülans modeline uygun olan Two-Layer All y+ Wall Treatment Modeli kullanılmıştır. Bu model, y+ değerinin düşük ya da yüksek olduğu bölgelerde farklı çözümler sunarak y+ değerlerinde esneklik sağlanmasına yardımcı olmuştur. Diğer yandan analizler sırasında çıkış yüzeyinde görülebilecek ters akışları engellemek ve sonuçların yakınsamasını iyileştirmek amacıyla salyangoz çıkış yüzeyi ile çark giriş yüzeyi bir miktar uzatılmıştır. Çözüm ağında hexahedral hücreler kullanılmıştır. Sonuçların çözüm ağı sıklığından bağımsızlığını sağlamak amacıyla çözüm ağı hücre boyutu değiştirilmiş ve pompayı karakterize eden ana performans parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Hücre boyutunun değişimi ile hücre sayısının, hacimsel debinin, basma yüksekliğinin, mil gücünün ve hidrolik verimin değişim sonuçları Tablo 2'de yer almaktadır. Yaklaşık 2 M çözüm ağı hücresinden sonra sonuçların değişmediği görüldüğünden bu sıklığın yeterli olduğu görülmüş ve çalışmalara ilgili hücre boyutu ile devam edilmiştir.

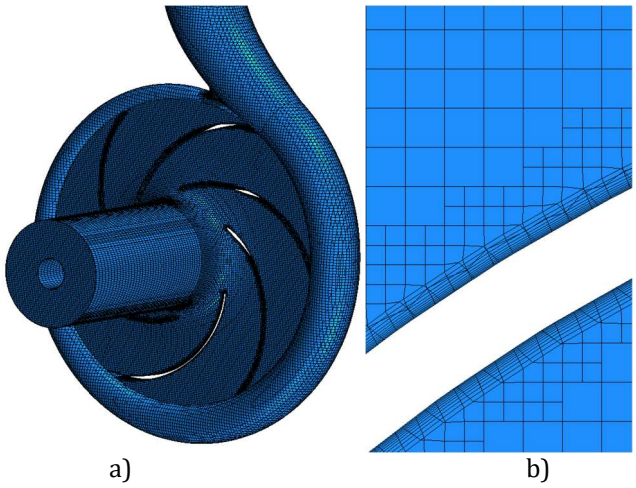
Tablo 2. Çözüm ağı hücre boyutunun sonuçlara etkisi

Hücre Sayısı	Hücre Boyutu	Q [m³/h]	H [m]	P_m [kW]	η [-]
~1M	10 mm	122	34.8	14.35	0.80
~1.5M	4 mm	122	35.4	14.06	0.83
~2M	2 mm	122	35.4	14.00	0.84
~4M	1.5 mm	122	35.4	13.99	0.84

Diğer yandan katı yüzey kenarlarında yüksek gradyenlerin olduğu bölgelerdeki akışı doğru hesaplayabilmek için sınır tabaka çözüm ağı kullanılmıştır. Çözüm ağı hücre çalışmasına ait bir görsel Şekil 2'de, nihai çözüm ağına ait görsel ise Şekil 3'te yer almaktadır.

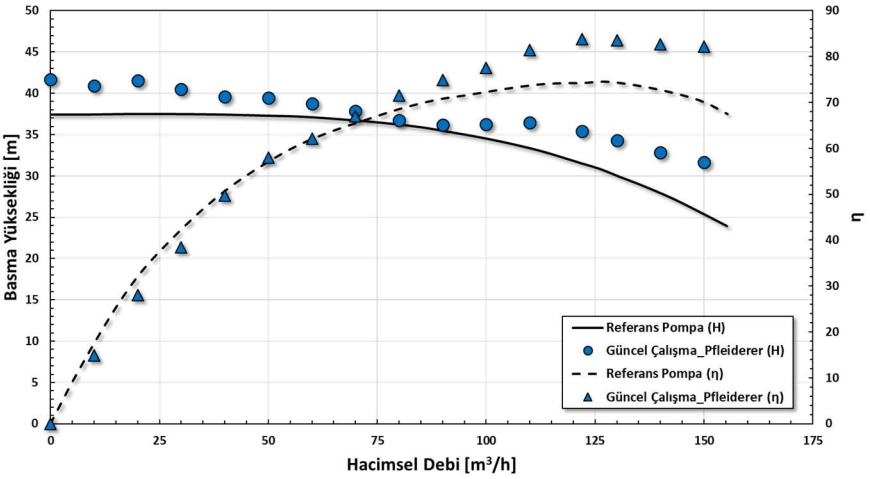


Şekil. 2 Pompa ortasında alınmış kesitte çözüm ağı yapısı a) 1M, b) 1.5M, c) 2M, d) 4M



Şekil. 3 Çözüm ağı a) pompa yüzeyleri, b) çark kanadı etrafında sınır tabaka

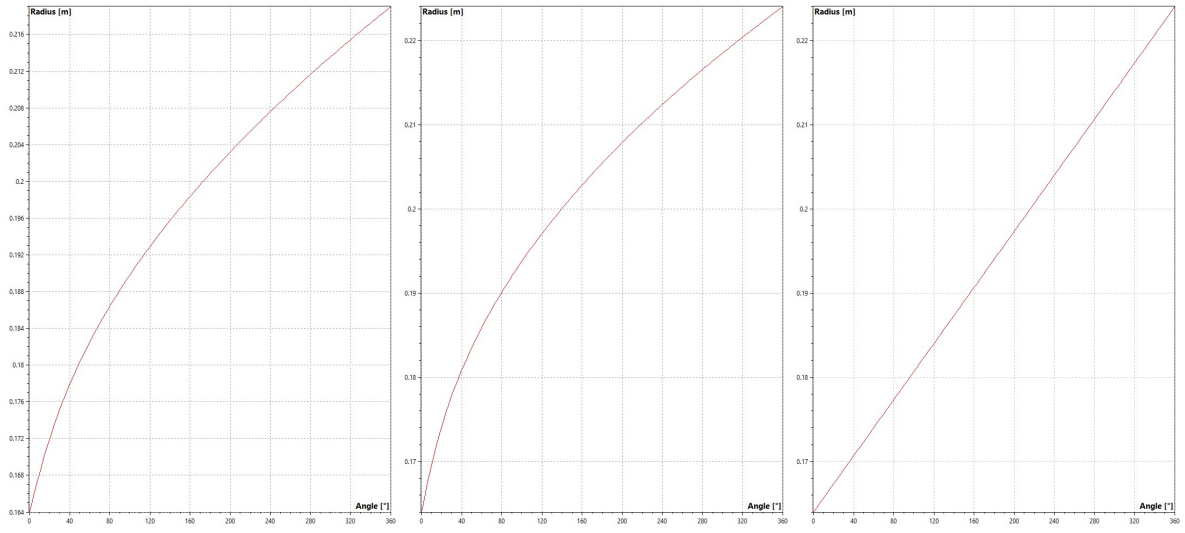
Doğrulanan çözüm ağı ile elde edilen pompanın performans eğrisi ticari referans pompanınki ile karşılaştırılmış olup basma yüksekliği ve hidrolik verimin hacimsel debi ile değişimi Şekil 4'te gösterilmektedir. Tasarım debisinde (122 m^3/h), yeni tasarlanan pompanın basma yüksekliğinin katalogdakine göre yaklaşık %11 ve hidrolik verimin ise %12 kadar daha fazla olduğu görülmektedir. Tasarım debisinden yüksek debilerde ise bu oran artmaktadır. Pürüzlülük etkisi ve mekanik verim HAD çalışmasında dikkate alınmadığı için verim ve basma yüksekliğinin HAD çalışmasında daha yüksek çıkmasının beklenebilecek bir sonuç olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca referans pompa ile tasarlanan pompa birebir aynı pompa değildir. Referans pompanın kanat yapısı, sayısı, salyangoz yapısı gibi birçok parametresi bu çalışmadaki pompanın tasarımı sırasında tahmini değerlerle belirlenmiştir. Neticede çalışmanın esas konusu olan salyangoz tasarım yönteminin incelenmesi amacıyla pompa çark ve salyangozu tasarlanarak performans eğrisi elde edilmiştir. Bu ilk çalışmada salyangoz Pfleiderer yöntemi ile tasarlanmıştır.



Şekil. 4 Referans pompanın ve bu çalışmada tasarlanan pompanın karakteristik eğrileri

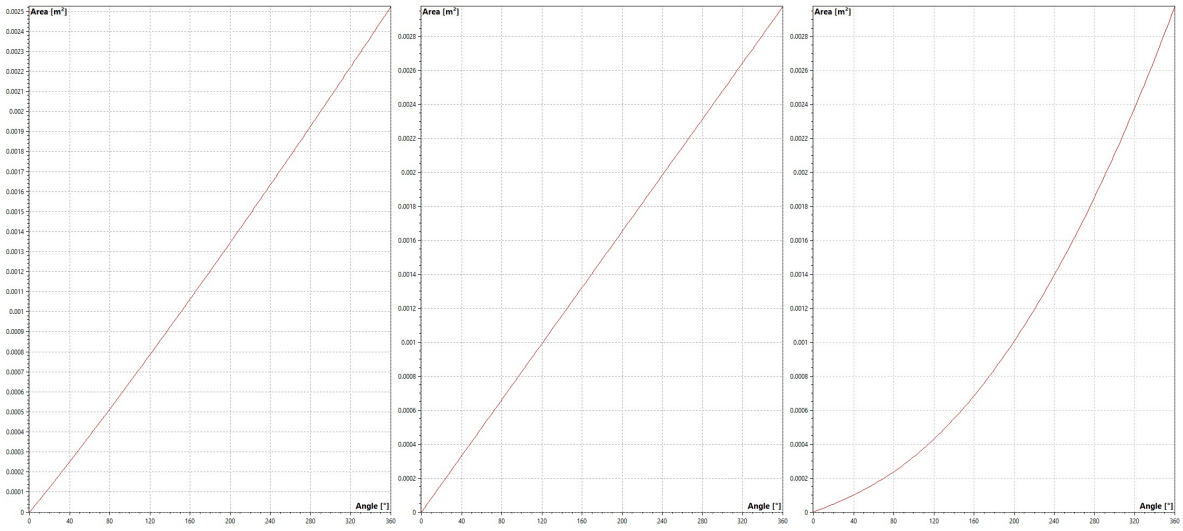
III. Salyangoz Tasarımları Ve Pompa Performansına Etkileri

Pfleiderer [8] yönteminin ardından tasarlanan pompa çarkı ve salyangoz çıkış kesiti sabit tutularak salyangoz tasarımı değiştirilmiş, bu kez önce Stepanoff [9] daha sonra doğrusal çap artış yöntemleri kullanılarak salyangoz geometrileri oluşturulmuştur. Bu yöntemler arasındaki fark şu şekilde açıklanabilir. Tasarım, Pfleiderer yönteminde akışkanın çevresel yöndeki hız bileşeni ile merkeze göre olan yarıçapının çarpımının yani açısal momentumun sabit olması esasına, Stepanoff yönteminde ise çevresel yön boyunca çevresel hızın sabit kalması esasına göre gerçekleştirilmiştir. Son olarak doğrusal çap artış yönteminde, salyangoz çapının çevresel yöndeki açı ile doğrusal bir şekilde arttığı bir salyangoz tasarımı gerçekleştirilmektedir. Her 3 tasarıma ait salyangoz çap ve alan artış eğrileri sırasıyla Şekil 5'te ve Şekil 6'da gösterilmektedir.



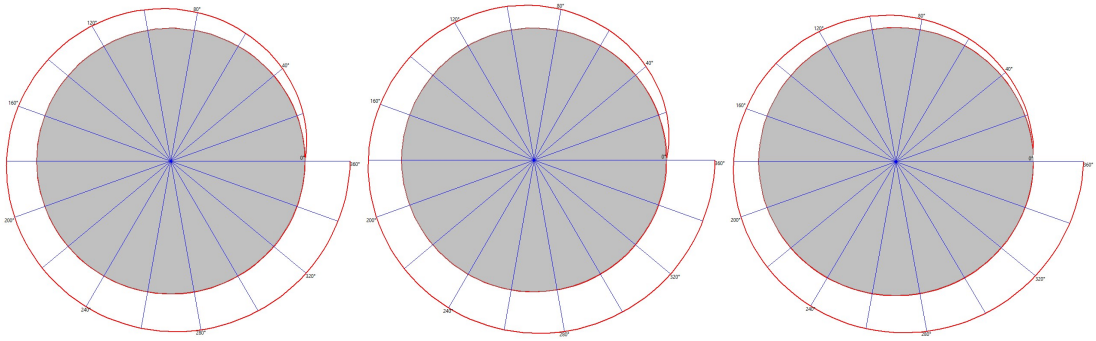
a) b) c)

Şekil. 5 Salyangoz çapının sarılma açısı ile değişimi a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı



a) b) c)

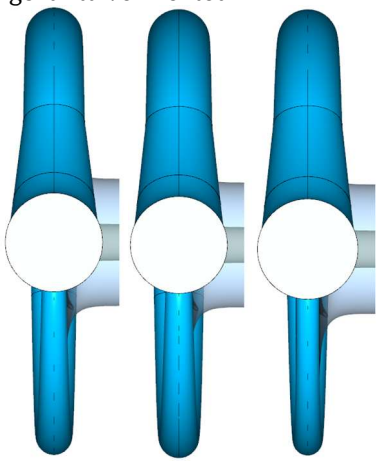
Şekil. 6 Salyangoz kesit alanının sarılma açısı ile değişimi a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı



a) b) c)

Şekil. 7 Salyangoz yan görünümünün sarılma açısı ile değişimi a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı

Şekil 7'de ve Şekil 8'de ise tasarım yönteminin etkisinin salyangoz geometrisine etkisi daha net bir şekilde görülmektedir. Özellikle doğrusal çap artış yönteminde salyangoz yüksekliği düşük sarılma açılarında diğerlerine göre daha düşük kalmakta, salyangoz sonuna doğru ise eğimini arttırarak bu kez diğerlerine göre daha hızlı bir şekilde artarak aynı çıkış flanş çapına ulaşabilmektedir. Pfleiderer ve Stepanoff yöntemleri ise birbirine çok yakın bir görüntü vermektedir.

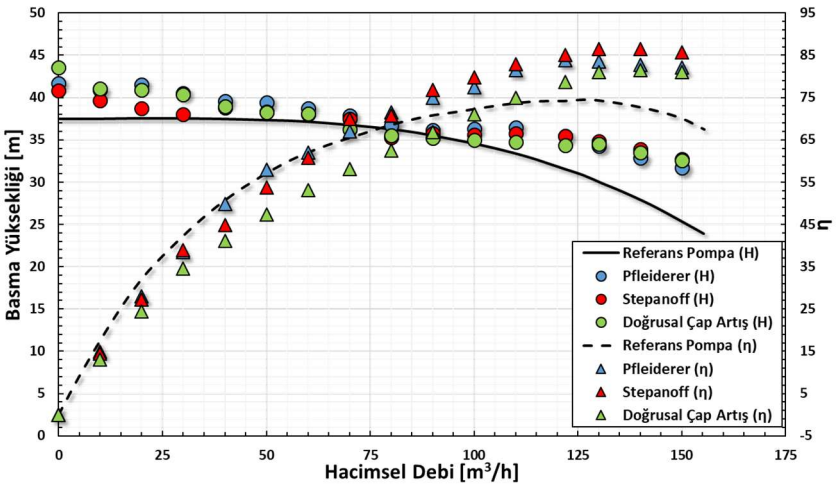


a) b) c)

Şekil. 8 Salyangoz yan görüntüsü a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı

IV. SONUÇLAR

Stepanoff ve doğrusal çap artışı yöntemi ile tasarlanan salyangozlu pompa-salyangoz çiftlerinin HAD analizleri doğrulama çalışmasındakine benzer şekilde gerçekleştirilmiş, pompa karakteristikleri elde edilmiştir. Basma yüksekliği ve verim eğrileri Şekil 9'da karşılaştırılmaktadır. Tasarım debisinde en yüksek basma yüksekliği ve verimi Stepanoff yönteminin verdiği görülmektedir. Pfleiderer yönteminde basma yüksekliği neredeyse Stepanoff ile aynı iken doğrusal çap artışı yönteminde yaklaşık % 3 daha düşüktür. Verime gelince ise yine sıralama aynı olup Pfleiderer yönteminin verimi Stepanoff'a göre % 1 düşüktür. Doğrusal çap artış yönteminde ise bu değer % 6 kadar düşmektedir. Bir diğer tespit ise her üç pompanın da maksimum veriminin 120-150 m^3/h aralığında yaklaşık sabit kalmasıdır. Bu bölgede de yine Stepanoff'un performansının en iyi olduğu görülmüştür. Tasarım debisinden düşük debilerde ise Pfleiderer basma yüksekliği ve verimi Stepanoff'un önüne geçmiştir. Her ne kadar basma yüksekliği Stepanoff'a göre daha iyi sonuç verse de doğrusal çap artış yönteminin verimi ise yine en düşük kalmıştır.



Şekil. 9 Pompa karakteristik eğrilerinin karşılaştırılması

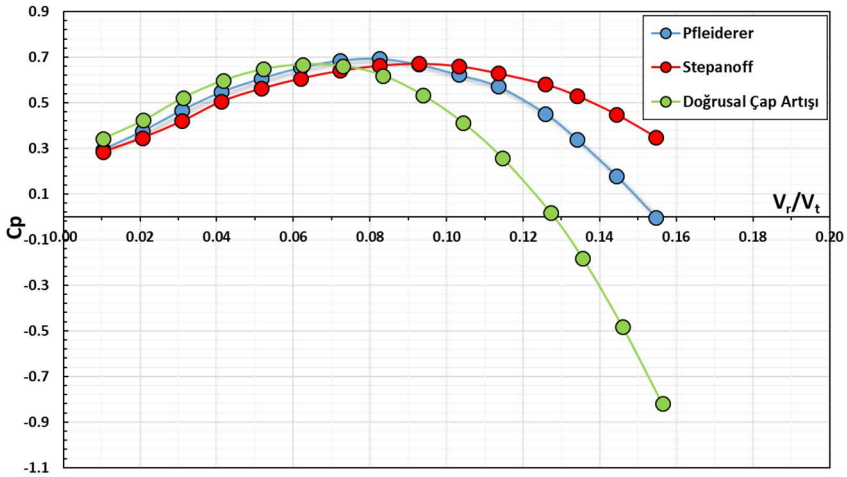
Salyangoz tasarım yönteminin değişimiyle beraber Şekil 9'da elde edilen performans eğrilerinde görülen farklılıklar salyangoz performans parametreleri tanımlanarak salyangoz performans eğrileri üzerinde incelenmiştir. Bu parametreler Denklem 1'de ve 2'de gösterilmektedir. Denklem 1'de elde edilen statik basınç geri kazanım katsayısı, salyangoz girişinden çıkışına kadar olan statik basınç değişiminin akışkanın giriş kinetik enerjisine oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Denklem 2'de tanımlanan toplam basınç kayıp katsayısı ise salyangoz girişinden çıkışına kadar olan toplam basınç kaybının yine akışkanın salyangoz girişindeki kinetik enerjisine oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$C_p = \frac{P_ç - P_g}{P_g^o - P_g} \tag{1}$$

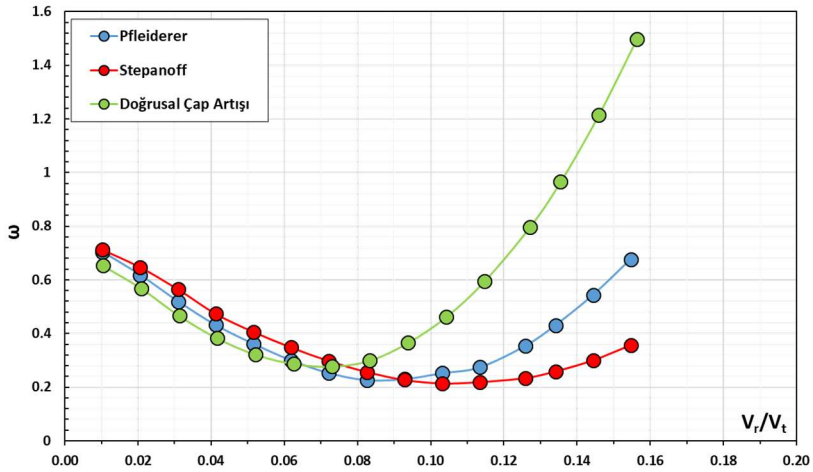
$$\omega = \frac{P_g^o - P_ç^o}{P_g^o - P_g} \tag{2}$$

Çark ve salyangoz ikilisinin beraber modellendiği çalışmada, salyangoz performansı salyangoz ile çark ara yüzeyindeki düzgün yayılı olmayan akış koşullarına bağlı olduğundan, Denklem 1 ve 2'de tanımlanan parametreler, yalnızca salyangozların modellendiği yeni simülasyon sonuçları için elde edilmiştir. Bu simülasyonlarda, Şekil 9'da yer alan hacimsel debilere denk gelecek şekilde, salyangoz girişinde (önceki simülasyonlarda çark-salyangoz ara yüzeyi olan yüzey) akışkan radyal hızı ile teğetsel hızlarının oranı (V_r/V_t) yüzeye düzgün yayılı biçimde tanımlanarak salyangozlar için C_p ve ω eğrileri elde edilmiş, sırasıyla Şekil 10'da ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde statik basınç geri kazanım katsayısının her üç salyangozda da düşük ve yüksek debilerde düşük, tasarım noktası etrafında ise yüksek olduğu gözlenmektedir. Maksimum değer ise pompa tasarım debisine göre daha yüksek debilerde oluşmuştur. Bu durum toplam basınç kayıp katsayısı eğrisinde ise tam terstir. Zira tasarım koşullarından uzaklaştıkça akışın yüzeyden ayrılması ya da girdap oluşumu gibi sebeplerle basınç kayıpları artmaktadır. Üç yöntem kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise 122 m^3/h debiye tekabül eden V_r/V_t'nin 0.126 olduğu civarda ve daha yüksek debilerde Stepanoff en yüksek C_p ve en düşük ω değerlerini vermiştir. Doğrusal çap artışında ise bu durum tam tersi olup en düşük C_p ve en düşük ω değerlerini vermiştir. Yaklaşık 70 m^3/h (V_r/V_t=0.072) ve altındaki debilerde ise durumun tersine döndüğü görülmektedir.

Doğrusal çap artış yöntemi ile tasarlanan salyangozun C_p değeri üç salyangoz içerisinde en yüksek olup ω en düşüktür.

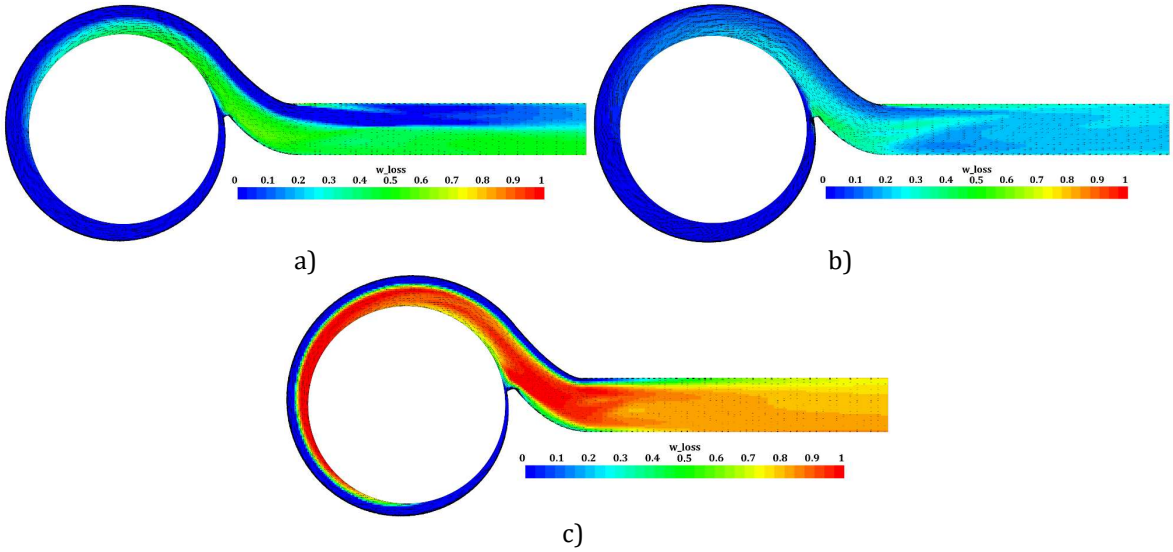


Şekil. 10 Yalnızca salyangozun modellendiği simülasyonlarda elde edilen statik basınç geri kazanım katsayısı eğrileri



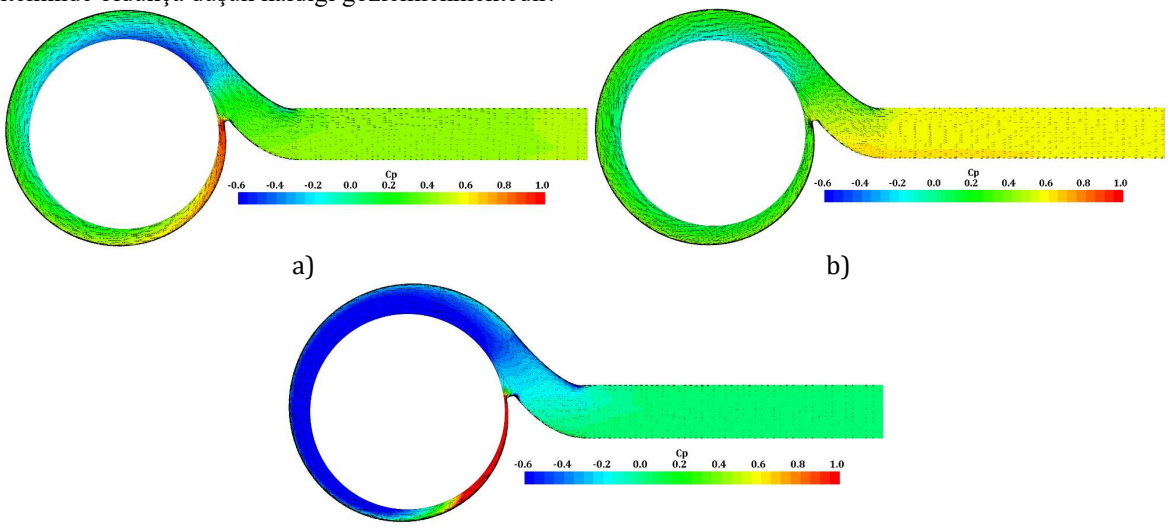
Şekil. 11 Yalnızca salyangozun modellendiği simülasyonlarda elde edilen toplam basınç kayıp katsayısı eğrileri

Şekil 12'de yalnızca salyangozun modellendiği simülasyonlarda tasarım debisinde 122 m^3/h (V_r/V_t=0.126) elde edilmiş toplam basınç kayıp katsayısı konturları yer almaktadır. En düşük kayıp katsayısına Stepanoff yöntemi ile, en yükseğe ise doğrusal çap artışı yöntemi ile tasarlanan salyangozun sahip olduğu yine görülmektedir.



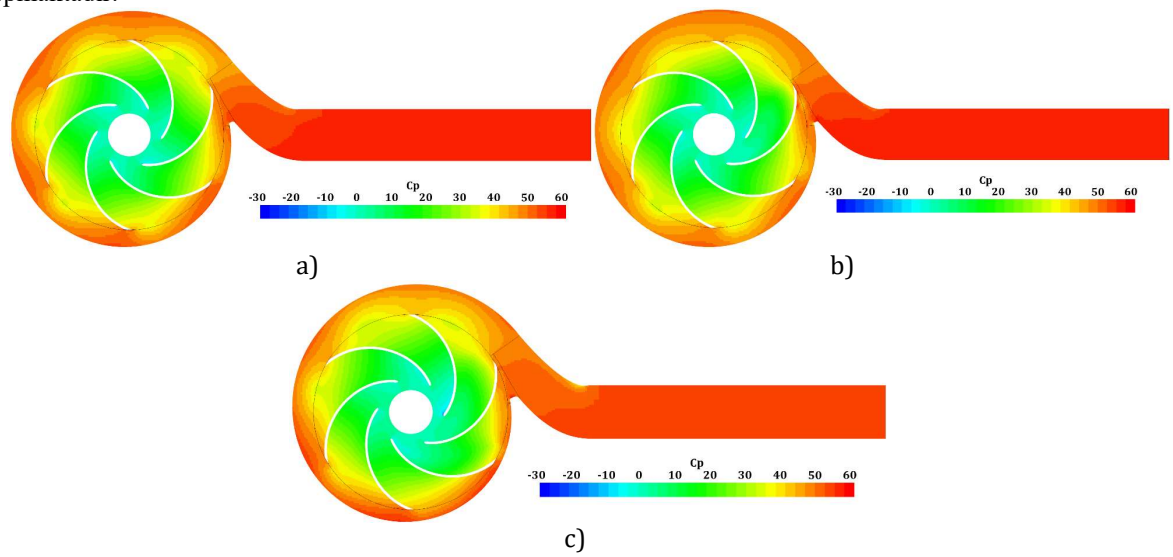
Şekil. 12 Tasarım debisinde salyangoz içerisindeki toplam basınç kayıp katsayısı konturları a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı

Bu durumun etkisi Şekil 13'te statik basınç geri kazanım katsayısı konturlarında da görülmektedir. Pfleiderer ve Stepanoff basınç artışı konturları birbirine nispeten yakın görünürken C_p değerlerinin doğrusal çap artış yönteminde oldukça düşük kaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil. 13 Tasarım debisinde salyangoz içerisindeki statik basınç geri kazanım katsayısı konturları a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı

Şekil 14'te ise Şekil 13'te verilen konturlar ile aynı debi ve koşullarda, ancak çalışmanın ilk bölümünde yer alan, salyangoz ve çarkın birlikte modellendiği simülasyonlardan elde edilmiş konurlardır. Çark ve salyangoz boyunca C_p değerleri her üç yöntemde de benzer bir görüntü vermektedir. Yalnızca salyangozun tam çıkış bölümünde doğrusal çap artışı yönteminde basınç artışının diğer iki yönteme göre az bir miktar düşük kaldığı göze çarpmaktadır.



Şekil. 14 Tasarım debisinde pompa içerisindeki statik basınç geri kazanım katsayısı konturları a) Pfleiderer, b) Stepanoff, c) Doğrusal çap artışı

V. TARTIŞMA

Pompa çarkı ve salyangozunun birlikte modellendiği simülasyonlar sonuçları ile yalnızca salyangozun modellendiği simülasyonların sonuçları karşılaştırıldığında, Şekil 10 ve 11'de elde edilen sonuçlar ile Şekil 9'da elde edilenlerin tutarlı oldukları değerlendirilmektedir. Zira tasarım debisinde ve daha yüksek debilerde Stepanoff ile tasarlanan salyangoz sonuçları daha yüksek basma yüksekliği ve verim sonuçları gösterirken bu durum pompa performansına da yansımıştır. Diğer yandan düşük debilerde bu durum yalnızca salyangozun olduğu simülasyonlarda terse dönmüş, doğrusal çap artış yöntemi ile tasarlanan salyangoz diğerlerine göre daha yüksek debi ve verim göstermiştir. Şekil 9'daki pompa karakteristikleri üzerinde basma yüksekliği eğrisine de bu durum yansırken, verim için söz konusu olmamıştır. Yüksek debilerde olduğu gibi bu bölgede de doğrusal çap artış yöntemi diğer yöntemlere göre daha düşük verim göstermiştir. Esasen Şekil 10 ve Şekil 11 incelendiğinde Stepanoff eğrisinin minimum kayıp debisinin daha yüksek, doğrusal çap artışının ise daha düşük debilerde oluştuğu görülmektedir. Şekil 9'da elde edilen

yüksek debilerde Stepanoff yönteminin, düşük debilerde ise doğrusal çap artış yönteminin (yalnızca basma yüksekliği için) ön plana çıkmasının bu nedenle olduğu değerlendirilmektedir. Düşük debilerde doğrusal çap artış yönteminin bu duruma aykırı şekilde yine de düşük kalmasının nedeninin çark-salyangoz ara yüzeyinde oluşan akış koşulları olabileceği değerlendirilmektedir. Zira, tasarım dışı koşullarda çark ve salyangoz etkileşim yüzeyinde homojen olmayan akış koşullarının pompa performansına etkileri olması beklenmektedir. Şekil 13 ve 14 karşılaştırıldığında bu etki görülebilmektedir. Aynı debide elde edilen statik basınç geri kazanım katsayısı konturlarında çark da modele dahil iken sonuçlar bir hayli yakın iken, yalnızca salyangoz analizi durumunda doğrusal çap artış yöntemi daha yüksek kayıplar nedeniyle ayrışmaktadır. Neticede üç yöntemden Stepanoff'a ait olan ω eğrisi minimum değerini tasarım debisine en yakın çalışma noktasında alarak bu debiden daha yüksek değerlerde nispeten yatay devam etmiştir. Böylece bu çalışma için en başarılı sonucu vermiştir.

VI. ÇIKARIM

Bu çalışmada gerçekleştirilen HAD simülasyonları, Pfleiderer, Stepanoff ve doğrusal çap artışına dayalı salyangoz tasarım yöntemlerinin pompa performansında nasıl farklı sonuçlar doğurduğunu ortaya koymuştur.

Pompa çalışma bölgesi boyunca her üç yöntem de birbirine yakın verim ve basma yüksekliği sonuçları vermiştir. Bu durum Pfleiderer ve Stepanoff yöntemlerinin kıyaslandığı [12] ile de uyumludur. Tasarım debisine yakın ve bir miktar üzerindeki bölgelerde Stepanoff yöntemi en yüksek, doğrusal çap artış yöntemi ise en düşük verimi göstermiştir. Düşük debilerde ise, yine doğrusal çap artış yöntemi en düşük verimi vermiş, en iyi verimi ise Pfleiderer yöntemi göstermiştir. Tüm eğri için bir yorum yapmak gerekirse Stepanoff ve Pfleiderer yöntemlerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği söylenebilir.

Çalışmanın yalnızca salyangoz modeli ile yapılan simülasyon kısmı ise gerekirse ilk adım olarak salyangoz tasarımının çarktan bağımsız yapılarak optimize edilip daha sonra çark ile etkileşimi sağlanabileceğini göstermiştir. Her ne kadar etkileşim neticesinde sonuçlar değişecek de olsa, yalnızca salyangoz analizi ile daha iyi sonuç veren geometrinin çark ile birlikte analiz yapıldığında da diğer salyangoz tasarımlarına göre daha iyi sonuç vereceği değerlendirilebilir.

Sonuçlar, pompa salyangozu tasarım yöntemlerinin pompa performansı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım seçiminde, belirli uygulama gereksinimleri ve akış koşulları dikkate alınmalıdır. Gelecekte bu çalışmanın farklı özgül hızlar için de tekrarlanması sonuçların genelleştirilebilmesi açısından faydalı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar, altyapı desteği için CFturbo GmbH'ye, Desica Tasarım Makina Tic. ve San. Ltd. Şti. firmasına ve TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] A. Javanbakht ve H. Ashtiani. "Impeller and volute design and optimization of the centrifugal pump with low specific speed in order to extract performance curves," *Journal of Computational Applied Mechanics,* 49(2), 359-366, 2018.

[2] K. Cho, A. San ve S. Thu. "Design of centrifugal pump volute-type casing," *International Journal of Science and Engineering Applications,* 8(8), 325-330, 2019.

[3] E. Ayder. "Experimental and numerical analysis of the flow in centrifugal compressor and pump volutes,» *Universiteit Gent Fakülteit Van De Toegepaste Wetenschappen, Gent*, 1993.

[4] D. Pan, A. Whitfield ve M. Wilson. "Design considerations for the volutes of centrifugal fans and compressors," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* 213(4), 401-410, 1999.

[5] S. Yang, F. Kong ve B. Chen. "Research on pump volute design method using CFD," *International Journal of Rotating Machinery,* 2011(1), 1-7, 2011.

[6] M. Mojaddam, A. Benisi ve M. Movahhedy. "Optimal design of the volute for a turbocharger radial flow compressor," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,* 229(6), 993-1002, 2015.

[7] Q. Gou, S. Xiao, T. Wang ve J. Yan. "Analysis and comparison of two kinds of design approaches for volutes of centrifugal pump," *Energies,* 2023(16), 1-18, 2023.

[8] C. Pfleiderer. "Die kreiselpumpen für flüssigkeit und gase," *Berlin: Heidelberg:Springer-Verlag*, 1955.

[9] A. J. Stepanoff. "Radial-und axialpumpen-theorie," *Entwurf, Anwendung, Berlin: Heidelberg:Springer-Verlag*, 1959.

[10] Software, *CFturbo GmbH,* 2021.

[11] Software, *Simcenter STAR-CCM+ version 2019 1,* 2019.

[12] A. Knapp, M. Böhle ve H. Roclawski. "Investigation of different design methods of volutes with circular cross sections for a single-stage centrifugal pump," *17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, *Maui, Amerika Birleşik Devletleri*, 2017.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yapay Zekâ Destekli Multiple Skleroz (MS) Hastalığı Teşhisi

Ceren ARSLAN[a], Arafat ŞENTÜRK[a]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** cerenarzlan@gmail.com

ÖZET

Multiple Skleroz (MS), merkezi sinir sistemi üzerinde kronik etkileri olan ve nörolojik işlev kaybına yol açabilen bir hastalıktır. MS'in neden olduğu hasar, genellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi ileri görüntüleme teknikleriyle saptanabilir. Bu çalışma, yapay zekâ destekli MRG verilerinin kullanımını, MS teşhis süreçlerindeki potansiyelini ve etkinliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Yapay zekâ teknolojilerinin, MRG görüntülerinden elde edilen verileri analiz ederek, hastalığın erken teşhisi, ilerleyişinin izlenmesi ve tedaviye yanıtın değerlendirilmesinde nasıl bir rol oynayabileceği üzerine yoğunlaşmıştır. Günümüzde, MS'in teşhisi ve takibi, genellikle klinik değerlendirme ve MRG gibi görüntüleme yöntemlerine dayanmaktadır. Ancak, MRG görüntülerinin yorumlanması zaman alıcı ve öznel olabilir; bu da teşhisin doğruluğunu etkileyebilir. Yapay zekâ teknolojileri, bu süreci otomatikleştirerek ve standartlaştırarak, teşhisin hızlı ve doğru bir şekilde yapılmasına yardımcı olabilir. Özellikle derin öğrenme ve makine öğrenimi gibi yöntemler, MRG verilerinden karmaşık örüntüleri tanıma ve analiz etme konusunda büyük potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada, yapay zekâ destekli MRG verilerinin MS teşhisinde kullanımı, mevcut yöntemlerle karşılaştırılarak incelenecektir. Yapay zekâ modellerinin eğitimi, test edilmesi ve doğrulanması için kullanılan veri setleri, algoritmalar ve sonuçların değerlendirilmesi süreçleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Multiple Skleroz (MS), Yapay Zekâ, manyetik rezonans görüntüleme.

Artificial Intelligence Assisted Multiple Diagnosis of Sclerosis (MS)

ABSTRACT

Multiple Sclerosis (MS) is a disease that has chronic effects on the central nervous system and can lead to loss of neurological function. The damage caused by MS can often be detected by advanced imaging techniques such as magnetic resonance imaging (MRI). This study aims to investigate the use of AI-enhanced MRI data and its potential and effectiveness in MS diagnostic processes. It will focus on how artificial intelligence technologies can play a role in early diagnosis of the disease, monitoring its progression and evaluating response to treatment by analyzing data from MRI images. Currently, the diagnosis and follow-up of MS is often based on clinical assessment and imaging modalities such as MRI. However, the interpretation of MRI images can be time-consuming and subjective, which can affect the accuracy of the diagnosis. By automating and standardizing this process, artificial intelligence technologies can help diagnoses to be made quickly and accurately. In particular, methods such as deep learning and machine learning offer great potential for recognizing and analyzing complex patterns from MRI data. In this study, the use of artificial intelligence-assisted MRI data in MS diagnosis will be examined in comparison with existing methods. The datasets, algorithms and results evaluation processes used for training, testing and validation of artificial intelligence models will be discussed in detail.

Keywords: Multiple Sclerosis (MS), Artificial Intelligence, magnetic resonance imaging.

I. GİRİŞ

Multiple Skleroz (MS), merkezi sinir sisteminde (MSS) iltihaplanma, demiyelinizasyon ve akson kaybının meydana geldiği kronik bir otoimmün hastalıktır [1]. MS, travma dışında genç bireylerde engelliliğin en yaygın nedenidir [2]. Geçmişte bir T-hücresi aracılı otoimmün hastalık olarak düşünülmesine rağmen, şimdi T hücrelerinin yanı sıra B hücrelerinin de patogenezde etkili olduğu bilinmektedir [3]. B hücrelerini hedef alan ilaçların etkinliği bu fikri desteklemektedir [4]. Hastalığın patogenezinde iltihaplanma ve nörodejenerasyon rol oynamaktadır. İltihaplanma ataklarla ilişkilendirilirken, nörodejenerasyon ataksız ilerleme ile ilişkilendirilmiştir [5], [6]. Aktif MS plaklarında iltihaplı infiltratlar zengin CD8 (+) T lenfositler içerir. Plazma hücreleri gibi B hücreleri daha az yaygındır. T hücreleri tarafından oluşturulan iltihap sonucunda oligodentrositlerde hasar oluşur ve sonuç olarak demiyelinizasyon meydana gelir. Hastalığın ileri evrelerinde aksonal hasar gelişir. Aksonal hasar geri dönüşümsüzdür [6], [7], [8]. Multiple Skleroz'da manyetik rezonans görüntüleme (MRG), MS plaklarını göstermede en hassas radyolojik görüntüleme yöntemidir [1]. Multiple Skleroz tanısında radyolojik bulguları tanımlayan çeşitli kılavuzlar yayımlanmıştır. İlk olarak 2001'de yayımlanan McDonald tanı kriterleri, ilk olarak 2010'da ve sonra 2017'de gözden geçirilmiştir [1]. 2016'da, MS'de manyetik rezonans görüntüleme için tanı kriterleri (MAGNIMS) yayımlanmıştır [9]. MS tanısında yaygın olarak kullanılan 2017 McDonald tanı kriterlerine göre, periventriküler, kortikal veya jukstakortikal, infratentoriyal ve omurilik bölgelerinde en az iki MS plağının varlığı, mekânda yayılım kriterlerini karşılamak için gereklidir. Önceki MRG'de olmayan yeni bir T2 lezyonunun veya gadolinyum (Gd) ile güçlendirilmiş bir lezyonun varlığı veya herhangi bir zamanda yapılan MRG'de eş zamanlı Gd ile güçlendirilmiş ve Gd ile güçlendirilmemiş lezyonların varlığı, zamanda yayılım kriterlerini karşılamak için gereklidir veya mekânda yayılım kriterlerini karşılayan hastalarda beyin omurilik sıvısında (BOS) oligoklonal bant varlığı gereklidir [10].

MS, dünya çapında milyonlarca bireyi etkileyen, merkezi sinir sistemini hedef alan kronik bir iltihabi hastalıktır ve önemli bir küresel sağlık sorunu teşkil eder [2], [3]. MS'in teşhisi ve sürekli izlenmesi, hastaların yaşam kalitesini artırmak ve tedavi sonuçlarını iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel olarak, MS'in teşhisi ve izlenmesi, uzman nörologların klinik değerlendirmeleri, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme ve klinik testlere dayanmaktadır. Ancak, bu yöntemler öznel, zaman alıcı ve insan hatalarına açık olabilir. Son yıllarda, YZ ve derin öğrenme tekniklerinin, tıbbi görüntü analizi ve teşhis alanında önemli bir potansiyele sahip olduğu giderek daha fazla kanıtlanmaktadır. Özellikle, örnek temelli YZ modelleri, geniş veri setlerini kullanarak karmaşık nörolojik hastalıkların tespiti ve izlenmesi için yeni bir yaklaşım sunar.

Yapay zekâ (YZ) yöntemleri birçok hastalığın tespiti ve teşhisi için geniş çapta kullanılmaktadır. Özellikle çoklu skleroz (MS) tespiti ve teşhisi için derin öğrenme ve makine öğrenimi tekniklerinden yararlanılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fano ve ark. [11], 51 MS ve 20 sağlıklı hasta için kohort çalışması yürütmüşlerdir. Çalışmada Naive Bayes, lojistik regresyon modelleri ve Rastgele Karar Ağaçları meta sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Özellik seçimi için sarıcı yöntemler uygulanmış ve %80 doğruluk elde edilmiştir. Siar ve ark. [12], 320 MS ve 791 sağlıklı hasta için MR görüntülerini sınıflandırmışlardır. Ön işleme adımı olarak, MR beyin görüntülerinin etrafındaki boşluklar kaldırılmıştır. Veri seti 25 katmanlı bir CNN ağı ile eğitilmiş ve sınıflandırma sonuçları doğruluk için %96,68, duyarlılık için %94,64 ve kesinlik için ise %100 bulunmuştur. Eitel ve ark. [13], MS sınıflandırması için bireysel yama filtre katmanlarına dayalı bir model sunmuş ve veri seti 76 MS ile 71 sağlıklı hastanın MR görüntüsünü içermiştir. %80,92 doğruluk elde edilmiştir. Alijamaat ve ark. [14], 38 MS ve 20 sağlıklı hastanın MR görüntülerine histogram germe ve veri artırma ön işlemleri uygulamıştır. Önerilen yöntemlerinde iki boyutlu ayrık Haar dalga dönüşümü ile bir CNN ağı kullanılmıştır. Doğruluk, duyarlılık ve kesinlik sonuçları sırasıyla %99.05, %99,14 ve %98.43 olarak elde edilmiştir. Sepehvand ve ark. [15], MS hastalığını 3D CNN ağı ile sınıflandırmıştır. Çalışmada 1.068 MS hastasını içeren bir veri seti kullanılmış ve önerilen uçtan uca 3D CNN ağı için sırasıyla %80,21 doğruluk, %79,16 özgüllük, %80.11 duyarlılık ve %91.82 kesinlik sonuçları elde edilmiştir.

Narayana ve ark. [16], 1.008 hastadan alınan 1.970 MR görüntüsü ile derin öğrenme tabanlı MS tespiti yapmışlardır. Anizotropik difüzyon filtreleme, kafatası soyulması ve ön yargı düzeltme ön tedavi yöntemleri

olarak uygulanmıştır. Önerilen yöntemde VGG16 ağını kullanarak, %72 özgüllük ve %70 duyarlılık elde etmişlerdir. Krishnamoorthy ve ark. [17], MS lezyonlarını CNN ağı ile tespit etmiştir. Veri seti 1.000 sağlıklı kontrol ve 1.000 MS hastasının görüntülerini içermekte olup, yazarlar AlexNet, VGG16, VGG19, ResNet18 ve ResNet50 önceden eğitilmiş modellerini karşılaştırmışlardır. VGG16 ile elde edilen doğruluk, özgüllük, duyarlılık ve kesinlik sonuçları sırasıyla %94,50, %94.06, %94,95 ve %94,00 olarak bulunmuştur. Zhang ve ark. [24], AlexNet ağının katmanlarını değiştirerek MS'i sınıflandırmıştır. Veri seti 20 sağlıklı ve 38 MS hastasının MR görüntülerini içermekte olup, %98,17 doğruluk, %98,21 özgüllük ve %98.15 F1-puanı elde edilmiştir. Zhuo ve ark. [18], astrocytoma, ependymoma, MS ve nöromiyelit optika spektrum bozukluklarını MultiResUNet ve DenseNet121 ağları kullanarak sınıflandırmıştır. Veri seti 490 hastanın görüntülerini içermekte ve %96 doğruluk elde edilmiştir. Caba ve ark. [19], MS tespiti için MR görüntülerini sınıflandırmıştır. ADVANCE veri setinde MS hastalarına ait 1.512 görüntü, ASCEND veri setinde 886 MS hastası ve DECIDE veri setinde MS hastalarına ait 1.841 görüntü bulunmaktadır. Doğruluk, özgüllük ve duyarlılık sırasıyla %94,12, %93.55 ve %94,44 olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmalar, MS teşhisi için YZ yöntemlerinin etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle derin öğrenme ve makine öğrenimi teknikleri, yüksek doğruluk oranları elde etmekte ve hastalığın erken teşhisinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tekniklerin kullanımı, hastalığın yönetiminde ve tedavisinde önemli iyileştirmeler sağlayabilir.

II. MATERYAL VE METOT

MobileNetV2, EfficientNet ve özel CNN ağı modelleri, derin özellik çıkarma konusunda önemli ilerlemeler sunmaktadır [19]. Bu modeller, geleneksel derin öğrenme modellerinden farklı yeni bir yaklaşım benimsemektedir. Derinlikli Ayrılabilir Evrişim gibi yenilikçi evrişim katmanları, geleneksel CNN mimarilerine kıyasla daha etkin bir özellik çıkarma süreci sunar ve daha az hesaplama gereksinimleriyle daha hızlı çalışabilen bir model sonucunu doğurur. Ayrıca, önceden eğitilmiş MobileNetV2 modelleri, büyük bir veri seti üzerinde eğitilmiş olup, transfer öğrenme uygulamaları için uygun bir temel sağlar, böylece modelin çeşitli görsel tanıma görevlerinde hızlı ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu çalışmada, MobileNetV2 modelinin sağladığı yeniliklerin yanı sıra, özel bir yenilik olarak EfficientNet ve CNN ağı geliştirilmiştir. Bu özelleştirilmiş EfficientNet ve CNN ağı, MRI görüntülerinin özel gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmıştır ve böylece hazır olarak kullanılan MobilNetV2 gibi modelleri geliştirerek, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) görüntü analizi için özelleştirilmiş bir çözüm sunmaktadır [20] .

Bu çalışma, MRI verilerinin analizine özelleştirilmiş bir yaklaşım sunarak önemli katkılarda bulunulması hedeflenmiştir. İlk olarak, 224 × 224 piksel boyutundaki MRI görüntülerini daha küçük 28 × 28 piksel boyutundaki parçalara ayırarak bir veri işleme yöntemi geliştirdik. Bu, görüntü verilerinin daha etkin bir şekilde işlenmesini sağladı ve işleme sürelerini azalttı. Ardından, bu 28 × 28 piksel boyutundaki parçalardan elde edilen verileri işlemek için MobileNetV2, EfficientNet özelleştirilmiş CNN mimarisini kullanan orijinal bir özellik çıkarma stratejisi geliştirdik. Bu strateji, tam bağlantılı katmanlardan ziyade benzersiz özellikler çıkarmaya odaklandı. Bu yöntemin ana avantajları, veri boyutunu azaltırken önemli özellikleri koruyabilmesidir. Sonuç olarak, bu çalışma, MRI görüntülerinden özellik çıkarma konusunda etkili bir yaklaşım sunarak, tıbbi görüntü analizi ve teşhis uygulamalarında kullanılabilirliğini potansiyel olarak artırabilir. Aynı zamanda gelecek araştırmalar için bir rehberlik sunabilir. Bu çalışma, MRI görüntülerinden özellik çıkarma konusunda yeni bir yöntem sunarak alana katkıda bulunur ve alanın gelişimini ilerletir.

Bu çalışmada, kullanılan veri seti, Multiple Skleroz (MS) Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) veri setidir [20] . MS MRI veri seti, dört farklı veri kategorisinden oluşmaktadır: MS-Aksiyal, MS-Sagital, Sağlıklı-Aksiyal ve Sağlıklı-Sagital grupları. Hem MS-Aksiyal hem de MS-Sagital grupları, multiple sklerozu (MS) olan bireylerden oluşmaktadır ve toplamda 21 erkek ve 51 kadın olmak üzere 72 katılımcı bulunmaktadır. Her iki MS grubunun ortalama yaşı 28,4 ± 5,66 yıl olarak belirlenmiştir ve MRI görüntüleme yöntemlerine göre kategorize edilmiştir. Özellikle, MS-Aksiyal grubu 650 MRI görüntüsü içerirken, MS-Sagital grubu 761 MRI görüntüsü içermektedir. Diğer yandan, Sağlıklı-Aksiyal ve Sağlıklı-Sağital grupları sağlıklı bireylerden

oluşmakta olup, sırasıyla toplam 57 ve 49 katılımcı bulunmaktadır. Sağlıklı birey gruplarının ortalama yaşları sırasıyla 29,5 ± 8,32 yıl ve 27.4 ± 6,48 yıldır ve her grup içindeki MRI görüntü sayısı belirtilmiştir. Sağlıklı-Aksiyal grubu 1002 MRI görüntüsü içerirken, Sağlıklı-Sağital grubu 1014 MRI görüntüsü içermektedir.

Çalışmanın devamında, ham beyin görüntülerinin işlenmesi sırasında, ilk adım olarak görüntülerden sadece beyin bölgesini içeren "beyin segment alanı" işlemi uygulanmıştır. Elde edilen görüntüler daha sonra 224×224 piksel boyutlarına yeniden boyutlandırılarak, işleme için daha yönetilebilir hale getirilmiş ve son olarak 28×28 piksel boyutunda küçük parçalara bölünmüştür. İşlem sürecini daha da iyileştirmek için, görüntülerden rastgele gürültüyü azaltmak amacıyla medyan filtresi, görüntülerin kontrastını artırmak için adaptif histogram eşitleme tekniği, modelin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla döndürme ve yansıtma gibi veri artırma teknikleri ve görüntülerin kenarlarını belirginleştirmek için Sobel operatörü gibi ek ön işleme adımları da uygulanmıştır. Bu adımlar, modelin eğitim sürecinin daha doğru ve etkili olmasını sağlamak için gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca çalışmada, MobileNet konvolüsyonel sinir ağı kullanılmıştır. MobileNet, özellikle boyut ve hesaplama gereksinimleri açısından hafif olacak şekilde tasarlanmıştır, yine de yüksek performans sunmayı hedeflemektedir. Öte yandan, MobileNetV2 [19], MobileNet'in ikinci versiyonudur ve önceki versiyona kıyasla daha az parametreye sahiptir. Bu parametrelerdeki azalma, daha hafif ve daha verimli derin öğrenme modellerinin oluşturulmasını sağlar. Hafif mimarisi, mobil cihazlar ve gömülü sistemler için optimize edilmiş olması, bu tür cihazlarda yüksek performanslı görüntü işleme uygulamaları için ideal bir çözüm haline getirmektedir. MobileNetV2, ayrıca önceden eğitilmiş bir model olarak da kullanılabilir. Önceden eğitilmiş modeller, geniş görüntü veri setleri üzerinde eğitilmiş derin sinir ağlarıdır ve sonrasında çeşitli görevler için ince ayar yapılabilir. MobileNetV2, görüntü işleme hattını basitleştirir ve görüntü verilerini modelin anlayabileceği bir formata dönüştürmeye yardımcı olur, bu da daha doğru sonuçlara yol açar. Modelin lineer darboğaz katmanı, ReLU aktivasyon fonksiyonunu kullanarak öğrenmeyi hızlandırır ve model stabilitesini artırır. Bu, MobileNetV2'nin daha hızlı öğrenmesine ve daha iyi sonuçlar elde etmesine katkıda bulunur. Sonuç olarak, MobileNetV2, hafif tasarımı ve yüksek performansı nedeniyle mobil cihazlar ve gömülü sistemler için ideal bir seçenek olarak öne çıkar [19].

Ek olarak; veri ön işleme, model tanımlama, eğitim, değerlendirme ve görselleştirme adımları dâhil olmak üzere bir CNN modeli geliştirilmiştir. Bu model, verilerin etkili bir şekilde eğitilmesini sağlamaktadır. CNN modeli çeşitli katmanlar kullanılarak tanımlanmıştır. Bu katmanlar arasında öznitelik çıkarma işlemi için birkaç Conv2D, aşırı öğrenmeyi engellemek amacı ile MaxPooling katmanaları, Dropput katmanı ve son olarak sınıflandırma işlemi için Dense katmanı bulunmaktadır. Model, çok sınıflandırma problemine uygun şekilde “softmax” aktivasyonunu kullanarak çıktı üretilmesi sağlamaktadır. Ayrıca, modelin karar verme sürecini anlamak için Grad-CAM teknikleri kullanılmıştır. Bu teknik modelin bir sınıfı neden seçtiğini ve hangi görüntü özelliklerinin modelin kararına en çok katkıda bulunduğunu görselleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu modelin eğitimi MS teşhisinde derin öğrenme tekniklerinin potansiyelini göstermektedir. Geliştirilen CNN modeli, MRI görüntülerindeki desenleri başarıyla öğrenerek hastalığın varlığını ve tipini tahmin etmeyi sağlamaktadır. Bu model yardımı ile teşhis süreçleri hızlandırılabilir ve doktorların hastalığı daha erken aşamalarda tespit etmeleri sağlanabilir.

Bu çalışmada, MobileNetV2, My CNN, VGG16, VGG19, ResNet50 tabanlı örnek derin özellik çıkarma yaklaşımları, bir adet MS MRI veri seti kullanılarak doğrulanmıştır. Örnek derin özellik çıkarma modelleri, COLAB ara yüzü kullanılarak uygulanmıştır. Analiz için yüksek performanslı masaüstü bilgisayar donanımı kullanıldı; bu donanım, 8 GB RAM'e ve 256 GB SSD'ye, 1.4 GHz 4 çekirdekli Intel Core i5 tabanlı macOS Big Sur işletim sistemine sahip. Önerilen piramit derin özellik çıkarma ve MR görüntü verilerinin işlenmesi için Colab (*. COLLAB) dosyaları kullanılmıştır.

III. SONUÇLAR

Eğitim süreci boyunca farklı modeller ve bu modellerdeki değişim oranlarını görüntülemek için farklı parametreler verilmiştir. MonileNetV2, ResNet ve VGG transfer öğrenme modellerinin MRI verilerinde ki MS'li ve hastalıksız beyinleri sınıflandırma üzerindeki performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Her bir model, farklı epoch değerleri, optimizasyon algoritmaları, yığın boyutları ve öğrenme oranları altında eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma sonucu elde edilen eğitim değerleri

Modeller	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
My CNN	95.68	97.86	96.24	96.46
Efficientnet	92	96	91	94
RESNET	84	85	87	86
VGG16	76	76	82	80
VGG19	96	97	97	96
MobileNetV2	97	96	98	97

IV. TARTIŞMA

Bu çalışma, MS teşhisinde YZ destekli MRI verilerinin kullanımının potansiyelini ve etkinliğini araştırmaktadır. Geleneksel olarak, MS teşhisi ve takibi, klinik değerlendirme ve MRI gibi görüntüleme modaliteleri ile yapılmaktadır. Ancak, MRI görüntülerinin yorumlanması zaman alıcı ve öznel olabilir. Bu çalışma, YZ destekli yöntemlerin MS teşhisindeki rolünü, erken teşhis, hastalığın izlenmesi ve tedaviye yanıtın değerlendirilmesi açısından incelenmiştir.

Bu çalışmanın yenilikçi yaklaşımları arasında, MobileNetV2, EfficientNet ve özel CNN ağları üzerine yapılan özelleştirmeler bulunmaktadır. Bu modeller, MRI görüntülerinin derin özelliklerini çıkarmak için tasarlanmış ve MS plaklarının tespiti için optimize edilmiştir. Yöntemler bölümünde detaylandırılan ön işleme adımları, görüntü verilerini daha etkili bir şekilde işlemek ve model eğitimi sırasında daha iyi sonuçlar elde etmek için tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, YZ destekli MRI analizinin MS teşhisinde geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sunduğu sonucuna varılmıştır. YZ modelleri, MRI görüntülerini hızlı ve doğru bir şekilde analiz edebilir, bu da teşhisin hızlandırılmasını ve tedaviye daha erken başlanmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşımlar, özellikle erken evre MS teşhisinde ve hastalığın ilerlemesinin izlenmesinde büyük potansiyele sahiptir. YZ destekli yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması, MS hastalarının yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlayabilir ve yaşam kalitelerini artırabilir.

KAYNAKLAR

[1] J. Oh, A. Vidal-Jordana, and X. Montalban, "Multiple sclerosis: Clinical aspects," *Curr Opin Neurol*, vol. 31, no. 6, pp. 752–759, 2018, doi: 10.1097/WCO.0000000000000622.

[2] G. Kobelt, A. Thompson, J. Berg, M. Gannedahl, and J. Eriksson, "New insights into the burden and costs of multiple sclerosis in Europe," *Multiple Sclerosis*, vol. 23, no. 8, pp. 1123–1136, Jul. 2017, doi: 10.1177/1352458517694432/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1352458517694432-FIG7.JPEG.

[3] J. M. Frischer *et al.*, "The relation between inflammation and neurodegeneration in multiple sclerosis brains," *Brain*, vol. 132, no. 5, pp. 1175–1189, May 2009, doi: 10.1093/BRAIN/AWP070.

[4] R. Dobson and G. Giovannoni, "Multiple sclerosis – a review," *Eur J Neurol*, vol. 26, no. 1, pp. 27–40, Jan. 2019, doi: 10.1111/ENE.13819.

[5] A. J. Coles *et al.*, "The window of therapeutic opportunity in multiple sclerosis: Evidence from monoclonal antibody therapy," *J Neurol*, vol. 253, no. 1, pp. 98–108, Jan. 2006, doi: 10.1007/S00415-005-0934-5/METRICS.

[6] E. Leray *et al.*, "Evidence for a two-stage disability progression in multiple sclerosis," *Brain*, vol. 133, no. 7, pp. 1900–1913, Jul. 2010, doi: 10.1093/BRAIN/AWQ076.

[7] B. Ruce *et al.*, "Axonal Transection in the Lesions of Multiple Sclerosis," *https://doi.org/10.1056/NEJM199801293380502*, vol. 338, no. 5, pp. 278–285, Jan. 1998, doi: 10.1056/NEJM199801293380502.

[8] H. Lassmann, "Pathology and disease mechanisms in different stages of multiple sclerosis," *J Neurol Sci*, vol. 333, no. 1–2, pp. 1–4, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.JNS.2013.05.010.

[9] M. Filippi *et al.*, "MRI criteria for the diagnosis of multiple sclerosis: MAGNIMS consensus guidelines," *Lancet Neurol*, vol. 15, no. 3, pp. 292–303, Mar. 2016, doi: 10.1016/S1474-4422(15)00393-2.

[10] A. J. Thompson *et al.*, "Diagnosis of multiple sclerosis: 2017 revisions of the McDonald criteria," *Lancet Neurol*, vol. 17, no. 2, pp. 162–173, Feb. 2018, doi: 10.1016/S1474-4422(17)30470-2.

[11] B. Bejarano *et al.*, "Computational classifiers for predicting the short-term course of Multiple sclerosis," *BMC Neurol*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, Jun. 2011, doi: 10.1186/1471-2377-11-67/TABLES/4.

[12] H. Siar and M. Teshnehlab, "Diagnosing and Classification Tumors and MS Simultaneous of Magnetic Resonance Images Using Convolution Neural Network∗," *2019 7th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, CFIS 2019*, Apr. 2019, doi: 10.1109/CFIS.2019.8692148.

[13] F. Eitel, J. P. Albrecht, F. Paul, and K. Ritter, "Harnessing spatial MRI normalization: patch individual filter layers for CNNs," Nov. 2019, Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1911.06278v1

[14] A. Alijamaat, A. NikravanShalmani, and P. Bayat, "Multiple sclerosis identification in brain MRI images using wavelet convolutional neural networks," *Int J Imaging Syst Technol*, vol. 31, no. 2, pp. 778–785, Jun. 2021, doi: 10.1002/IMA.22492.

[15] N. M. Sepahvand, T. Hassner, D. L. Arnold, and T. Arbel, "CNN prediction of future disease activity for multiple sclerosis patients from baseline MRI and lesion labels," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11383 LNCS, pp. 57–69, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-11723-8_6/TABLES/1.

[16] P. A. Narayana, I. Coronado, S. J. Sujit, J. S. Wolinsky, F. D. Lublin, and R. E. Gabr, "Deep learning for predicting enhancing lesions in multiple sclerosis from noncontrast MRI," *Radiology*, vol. 294, no. 2, pp. 398–404, Dec. 2020, doi: 10.1148/RADIOL.2019191061/ASSET/IMAGES/LARGE/RADIOL.2019191061.FIG4.JPEG.

[17] S. Krishnamoorthy *et al.*, "Automatic Intelligent System Using Medical of Things for Multiple Sclerosis Detection," *Comput Intell Neurosci*, vol. 2023, pp. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.1155/2023/4776770.

[18] B. Caba *et al.*, "Single-timepoint low-dimensional characterization and classification of acute versus chronic multiple sclerosis lesions using machine learning," *Neuroimage*, vol. 265, p. 119787, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.NEUROIMAGE.2022.119787.

[19] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L.-C. Chen, "MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks." pp. 4510–4520, 2018.

[20] G. Macin *et al.*, "An Accurate Multiple Sclerosis Detection Model Based on Exemplar Multiple Parameters Local Phase Quantization: ExMPLPQ," *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 4920*, vol. 12, no. 10, p. 4920, May 2022, doi: 10.3390/APP12104920.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Uyuşukluk Belirleme Sistemleri

Murat Avşar, Nihat Daldal, Kemal Polat*

[a]Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü,, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar: avsar-m@hotmail.com**

ÖZET

İnsanlar gündelik yaşamında kendi işiyle meşgul iken kişisel ihtiyaçlarına önem vermezler. Örneğin uykularına dikkat etmezler. Uyku insanın sağlığını koruması için bir gerekliliktir. Özellikle gündelik işlerimizi yaparken verimliliğimizi etkiler. Mesleği sürücü olan kişilerin ise bu olguya daha çok dikkat etmesi gerekir. Araç kullanırken uyumak hepimizin bildiği gibi doğru bir davranış değildir. Geçtiğimiz yıllarda meydana gelen kazaların birçoğu uykulu sürüşten kaynaklanmıştır. Bilim insanları bu konu ile ilgili araştırmalar yapmış ve katkıda bulunmuşlardır. Sürücünün uyuşukluğunu tespit etmek için 3 ayrı teknik üzerinde çalışmışlardır. Birinci teknik sürücünün anlık durumuna bağlı olarak göz ve göz kapaklarının hareketi ile ilişkisi, ikinci teknik araç durumu ve araç hızı, üçüncü teknik ise birinci ve ikinci tekniğin kombinasyonu olarak nitelendirilebilir. Burada yüz tanıma ve uyuşukluk halini tanımlamak için entegre kamera tarafından çekilen yüzün görüntüleri görüntü işleme yardımıyla tespit edilir. Python yazılım dili ile OpenCV açık kaynak kütüphanesi kullanılarak görüntü işleme gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı sürücünün göz hareketlerine, ağız hareketlerine ve başın konumuna odaklanmaktadır. Göz hareketleri anlık olarak sürekli izlenir. Sürücünün görüntüleri kamera tarafından yakalanır. Yakalanan görüntüler sürücünün uyku halini tespit etmek için yüzün tanınmasını sağlayan görüntü işleme modülüne aktarılır. Sürücünün gözleri kapandığında, esnediğinde ve başı yana doğru kaydığında sürücüye anlık olarak uyarı verir.

Anahtar Kelimeler: Kaskat sınıflandırma Uyuşukluk Belirleme Sistemleri, OpenCV

Drowsy Detection Systems

Murat Avşar[*], *Nihat Daldal, Kemal Polat*

[a]Düzce University, Düzce Vocational School, Department of Electricity and Energy, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Düzce/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** avsar-m@hotmail.com

ABSTRACT

People tend to neglect their needs while busy with their work in life. For example,they don't pay attention to their sleep. Sleep is a necessity for maintaining one's health. It particularly affects our efficiency while carrying out our daily tasks. People whose profession involves driving should pay even more attention to this phenomenon. Sleeping while driving, as we all know isn't a safe behavior. Many accidents in recent years have been caused by drowsy driving. Scientists have conducted research on this issue and made contributions. They have worked on there different techniques to detect driver drowsiness. The first technique involves the relationship between the movement of the eyes and eyelids and driver's instant condition. The second considers the vehicle's status and speed, while the third can be described as a combination of the first and second techniques. Facial recognition and images of the face captured by the integrated camera are processed using image processing techniques to detect signs of drowsiness. Aim of this study focus on driver's eye, mouth movements and head position. Facial movements are continuously monitored in real-time. When the driver's eyes close, They yawn or their head tilts sideways an immediate alert is issued to the driver.

Keywords: Cascade Classification Drowsy Detection, OpenCV

I. GİRİŞ

İnsanlar gündelik yaşamlarında kişisel işleri ile meşgul iken ihtiyaçlarına önem vermezler. Örneğin uykularına dikkat etmezler. Uyku insan sağlığının korunması için fizyolojik bir gerekliliktir. Özellikle gündelik işlerimizi yaparken uykusuzluk verimliliğimizi etkiler. Aktif olarak sürüş deneyimi olan kişilerin ise bu olguya daha fazla dikkat etmeleri gerekir. Araç kullanırken uyumak hepimizin bildiği üzere doğru bir davranış değildir. Geçtiğimiz yıllarda meydana gelen kazaların birçoğu uykulu araç kullanımından kaynaklanmaktadır. Bilim insanları bu konu ile ilgili araştırmalar yapmış ve katkıda bulunmuşlardır. Sürücünün uyuşukluğunu tespit edebilmek için üç ayrı teknik üzerinde çalışmışlardır. Birinci teknik sürücünün anlık durumuna bağlı olarak göz ve göz kapaklarının hareketi ile ilişkisi, ikinci teknik araç durumu ve araç hızı, üçüncü teknik ise birinci ve ikinci tekniğin kombinasyonu olarak nitelendirilebilir[1].

Yüz tanıma ve uyuşukluk halini tanımlamak için entegre bir kamera tarafından çekilen yüzün görüntüleri görüntü işleme algoritmaları ile tespit edilir. Python yazılım dili ve OpenCV açık kaynak kütüphanesi kullanılarak görüntü işleme gerçekleştirilmiştir. Bu makalenin amacı sürücünün göz hareketlerine, ağız hareketlerine ve başın konumuna göre uyuşukluğunun tespit edilmesine odaklanmaktadır. Gözler anlık olarak sürekli izlenir. Sürücünün görüntüleri kamera tarafından yakalanır. Yakalanan görüntüler kaskat sınıflandırıcı algoritmaları ile yüz bölgesi çıkartılır. Sürücünün uyku halini tespit etmek için yüzün tanınmasını sağlayan görüntü işleme modülüne aktarılır. Sürücünün gözleri kapandığında, esnediğinde ve başı yana doğru düştüğünde sürücüye uyarı verir.

II. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu model sürücülerin uyuşukluk halini önlemek için tasarlanmıştır. Kullanımı kolaydır. Büyük çaplı bir sisteme ihtiyaç yoktur. Baş, yüz ve gözlerin durumuna göre sürücüye anlık olarak bildirim verir.

Bappaditya Mandal ve arkadaşları, göz durumu üzerine güçlü görsel analize dayalı otobüs şoförleri için yorgunluk tespiti yöntemine odaklanmışlardır. Otobüs şoförlerinin izlenmesi için görüntü tabanlı bir yorgunluk tespit sistemi önermişlerdir. Sistem, baş-omuz tespiti, yüz tespiti, göz tespiti, göz açıklığı tahmini, göz kapağının kapanma yüzdesi tahmini ve yorgunluk seviyesi modüllerinden oluşturulmuştur. Spektral regresyona dayalı göz açıklığının seviyesini tahmin etme ve göz durumunu belirlemek için birleştirme algoritmalarını kullanmışlardır[2].

Kartik Dwivedi ve arkadaşları kaş ve göz hareketlerini tespit etmenin yeterli olduğuna dair çalışmalar yapmışlardır[3].

Chinadand Kumar ve arkadaşları IR kamera kullanarak göz bebeklerini tespit etmiş ve takip etmişlerdir. Uyuşukluğu belirlemek için göz hareketlerinin izlenmesi gerektiğini savunmuşlar ve sürücünün gözünün

açık veya kapalı olduğunu algoritma ile tespit etmişlerdir. İyi sonuçları elde etmek için çok sayıda eğitim verisinin gerekli olduğunu savunmuşlardır[4].

T. Vesselenvi ve arkadaşları, gözün hareketini tespit etmek için yapay sinir ağları katmanını kullanmışlardır. Bu katman vasıtasıyla EEG sinyal tekniğini kullanarak sürücünün görüntüsünün analizinin bulunması ile gözlerinin açık veya kapalı olduğu tespit edilmiştir[5].

III. Sürücüler İçin Önerilen Uyuşukluk Belirleme Sistemi

A. Yüz Belirleme

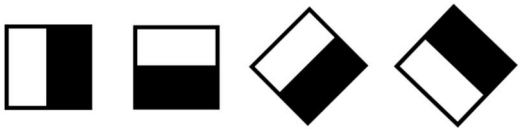
Yüz algılama tekniği bir görüntüdeki yüzleri tespit etmek ve sınıflandırmak için yapılan tekniktir. Yüz algılamak için kullanılan algoritma popüler Viola Jones algoritmasıdır[6]. Viola Jones algoritması doğruluğu ve sistem hızı ile diğer algoritmalardan daha ön plana çıkmıştır. Viola Jones algoritmalarının 4 temel adımı vardır.

1. Haar benzeri özelliklerin seçilmesi
2. Birleştirilmiş görüntü oluşturma
3. AdaBoost eğitimini çalıştırma
4. Sınıflandırıcı kaskatları oluşturma

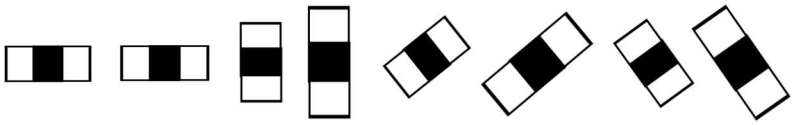
Haar benzeri özellikler nesne tespit alanında kullanılan dijital görüntü özellikleridir. Haar özellikleri, tüm insan yüzleri göz bölgesinin komşu piksellerinden daha koyu olduğu ve burun bölgesinin göz bölgesinden daha parlak olduğu gibi insan yüzünün genel bilgilerini içerir.

B. Haar Sınıflandırıcı

Yüz ve göz tespitinde kullanılan Haar kaskat sınıflandırıcısını kullanan bir yöntemdir. Haar kaskat sınıflandırıcısını kullanan nesne tespit sistemlerinin temelini, birbirine yakın bir araya gelen dikdörtgen piksel grupları arasındaki kontrast farkı beyaz ve siyah bölgeleri belirler. Viola Jones yüz ve göz tespit prosedürü basit özellik değerlerine göre görüntüleri sınıflandırır. Pikselleri doğrudan kullanmak yerine özelliklerinin kullanılmasının birçok nedeni vardır. En yaygın neden, özelliklerin sınırlı sayıda eğitim verisiyle öğrenme sürecinde zor olan alan bilgisini kodlamak için kullanılabilmesidir. Özelliklerin kullanılmasının bir diğer nedeni, işletim sistemine dayalı özelliklerin piksele dayalı sistemlere göre daha hızlı olmasıdır. Viola Jones yöntemi, %93.7 doğrulukla sonuçları hızlı bir şekilde sağlar[7].



Şekil. 1 Kenar benzeri özellikler



Şekil. 2 Çizgi özellikleri

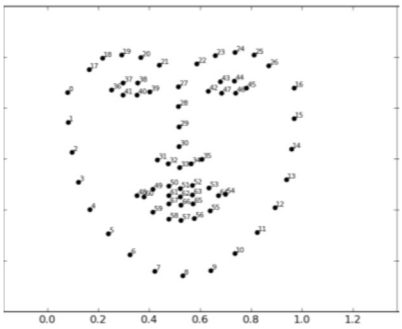


Şekil. 3 Dört kenarlı özellikler

Kenar özellikleri ve çizgi özellikleri sırasıyla kenarları ve çizgileri tespit eder. Dört kenarlı özellikler ise çapraz özelliklerin tespit edilmesi için kullanılır. Haar kare dalga formunda uzun bir dalgadır. İki boyuttaki kare dalga siyah ve beyaz bitişik iki kare olarak gösterilir. Giriş görüntüsündeki özelliklerin varlığı Haar özellikleri tarafından belirlenir. Her bir özelliğin sonucu siyah piksellerin toplamının beyaz piksellerin toplamına bölünmesi ile elde edilir.

C. Yüzün bağlantı noktaları

Yüzün parçalarını bağlantı noktaları ile temsil eden fonksiyondur. Yaygın olarak kullanılan bağlantı noktaları göz hareketleri, burun ucu, ağız konumu, kaşlar ve çene konumu olmak üzere 5 adet temsili noktalardır. Aşağıdaki şekilde örnek yüz bağlantı noktaları görülmektedir.

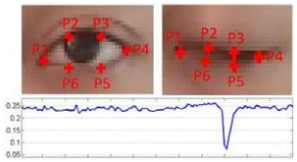


Şekil. 4 Örnek yüz bağlantı noktaları

Göz bölgesindeki işaretler gözün konumunu göstermektedir. Gözün açık ya da kapalı olduğunu belirlenmesi göz çevresindeki bağlantı noktaları ile ilişkilidir. Normal durumda gözün kapalı olma süresi 100-400 milisaniye aralığında değişir[8]. Aksi durumlar algoritma için uyarı niteliğindedir. Gözün işaretlerine bağlı olarak göz en-boy oranını gösteren(EAR) fonksiyonu aşağıdaki denklemde gösterilmiştir. Göz açıkken EAR değeri, gözün kapalı olduğu durumlarda daha yüksektir.

$$EAR = \frac{|P2-P6|+|P3-P5|}{2|P1-P\ |} \quad (1)$$

Gözün P1'den P6'ya kadar bağlantı noktaları vardır.



Şekil. 5 Gözün bağlantı noktaları ve gözün açık veya kapalı olduğu durumlarda EAR değeri

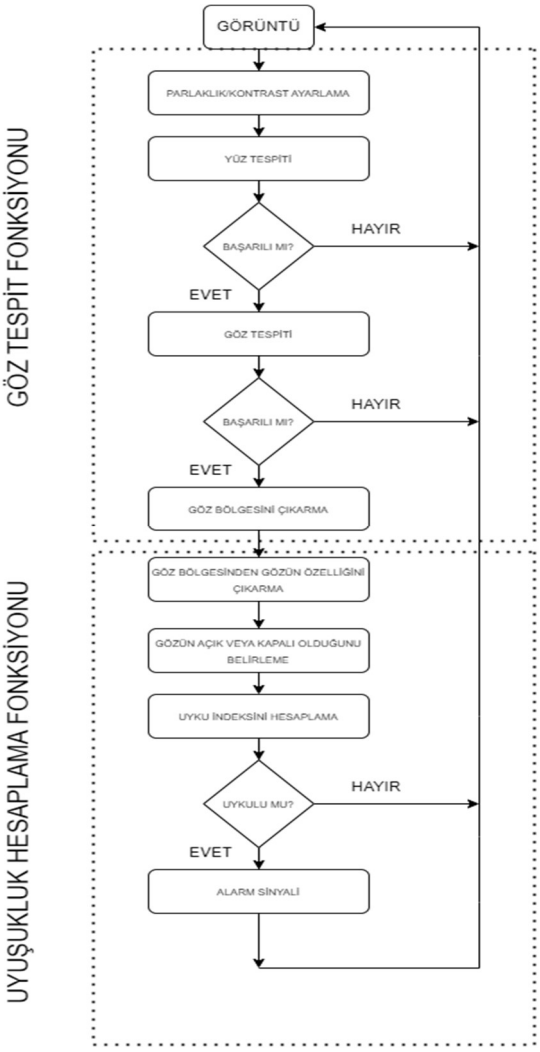
D. Baş pozisyonu

Baş pozisyonunun gerçek koordinatlarını belirlemek, başın kamera üzerindeki pozisyonu ile gerçek konumu arasındaki ilişkiye bağlıdır. Pozisyonları doğru tahmin edebilmek için sistem çalışmadan önce kalibrasyon yapılır. Pozisyon tahmini yapabilmek için gerçek konum ile kamera konumu arasında 6 adet nokta vardır. Bu noktalar sırasıyla sol göz kenarı, sağ göz kenarı, burun ucu, sol ağız kenarı, sağ ağız kenarı ve çene ucudur[9].

E. Uyuşukluk belirleme

Uyuşukluk belirlemenin tespiti için kullanılacak en iyi yöntemlerden biri görüntü işlemedir. Araç sürücüsünün gözlerinin açık veya kapalı olduğu, kapalı kalma süresi, uykulu olup olmadığı gibi durumlarda görüntü işleme iyi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Gözlerin kapalı olma süresinin hesaplanması için kullanılan PERCLOS indeksi, göz kapanma yüzdesini verir. Walter Wierwille ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmaya göre uyku algılama için en iyi değeri veren indekslerden biri olarak PERCLOS indeksi kabul edilmiştir[10].

F. Algoritma aşamaları

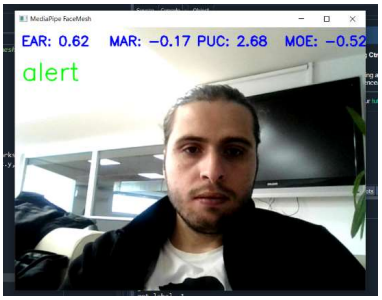


Şekil. 6 Uyuşukluk tespit algoritması

Webcam aracılığı ile girdi olarak görüntüler alınır. Görüntü alma işlemi gerçekleşene kadar bu işlem devam eder. Kameraya erişmek için açık kaynak görüntü işleme kütüphanesi olan OpenCV kullanılmıştır. Görüntünün girdi olarak kullanılabilmesi için yüzün gri tonlaması yapılır. Yüzün tespit edilmesi için daha önceki bölümlerde açıklanan kaskat sınıflandırıcı algoritmalar kullanılmıştır. Yüz tanıma işlemi için yüzün koordinatlarını belirleyen bir dizi döndürülür. Böylece yüzün her alanındaki çizgiler belirir. Sürücünün uykulu olup olmadığını belirlemek için kameradan çekilen anlık görüntüler algoritmaya uygulanır ve göz bölgesi çizgileri belirlenir.

IV. SONUÇ

Aşağıda verilen görüntüde sistem bize sürücünün anlık olarak uykulu olup olmadığı bilgisini vermektedir.



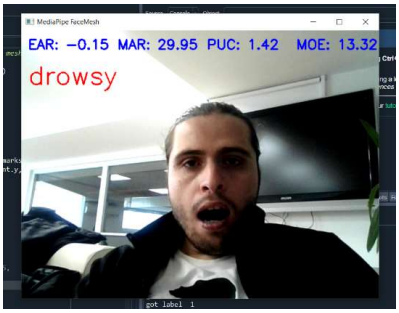
Görüntü. 1 Uyanık olma hali

Göz çevresindeki bağlantı noktaları arasında hesaplanan EAR değerine göre kişinin uyanık olduğu bilgisi ekrana uyarı olarak verilmektedir.



Görüntü. 2 Uyku hali

Yukarıda verilen Görüntü. 2'de sürücünün uyuşukluk durumunun aktif olduğu ve tehlikeli durumun varlığını belirtmektedir. Ekrana uyuşukluk uyarısı verilmiştir.



Görüntü. 3 Esneme hali

Ağızın konumu uyuşukluk için aktif olarak uyarı vermektedir. Sistem bu uyarıyı tehlike olarak algılayıp uyuşukluk durumunun aktif olduğunu bildirmektedir.



Görüntü. 4 Tam uyuşukluk

Baş pozisyonu, ağız konumu ve gözlerin kapanması ile tam uyuşukluk durumu aktif olmuştur. Bu durum çok tehlikeli bir durum olarak kabul edilmiş olup sistem uyarı vermektedir.

V. ÇIKARIM

Çalışılan model birden fazla yüz özelliğini girdi olarak alabilen ve direksiyon başında iken uyuşukluğun zamanında ve doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlayan bir yazılım aracı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Kullanıcının normal görüntüsünü çeken ve bunu giriş akışı ile karşılaştıran sistem, kullanıcının uykulu olup olmadığını control etmek için esneme ve göz hareketlerini algılar. Uyuşukluk algılandığında ekrana uyarı veren sistemdir. Projede en çok ihtiyaç duyulan kaliteli fotoğraf ve video çekebilen kamera ve işlemci hızıdır. Her görüntü karesinin hızlı bir şekilde işlenmesi zorunluluktur. Herhangi bir hata sürücünün veya çevresindekilerin hayatını tehlikeye atabilir. Sürüş sırasında uyuşukluk durumunu sürücüye uyarı vermenin yanında mobil cihaza anlık olarak araç konumunu bildirim olarak gönderen bir sistem çalışmayı daha güçlü hale getirebilir. Gece görüş için karanlıkta footğraf ve video çekebilen kameralar kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu projede bana her anlamda destek olan Sevgili Anneme, biricik eşime ve canımın bir parçası oğluma,
Beni bugüne kadar destekleyip ufkumu açan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Kemal POLAT'a,
Hayatımın dönüm noktası olan bugünlere ulaşmamda değerli katkıları bulunan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Nihat DALDAL'a,
Bu projeyi kabul eden Düzce Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği 5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu'nda emeği geçen herkese teşekkürlerimi borç bilirim.

KAYNAKLAR

[1] Q. Wang, J. Yang, M. Ren, and Y. Zheng, " Driver Fatigue Detection: A Survey," the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 8587- 8591, June 21- 23, 2006.
[2] Bappaditya Mandal, Liyuan L, Gang SW, Jie L. Toward Detection of Bus Driver Fatigue Based on Robust Visual Analysis of Eye State. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016,8,545-557. https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2582900
[3] Kartik Dwivedi; Kumar Biswaranjan; Amit Sethi, Drowsy driver detection using representation learning, 2014
[4] K.S. Chidanand Kumar, Brojeshwar Bhowmick, An Application for Driver Drowsiness Identification based on Pupil Detection using IR Camera, Intelligent Human-Computer Interaction, pp 73-82(2019).
[5] T. Vesselenvi, S. Moca, A Rus, T. Mitran and B. Tataru, Driver drowsiness detection using ANN image processing, (2017)
[6] M. J. Paul Viola, "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features," Accepted Conference On Computer Vision And Pattern Recoginiton, 2001.
[7] Viola P, Jones M. "Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features. In Proceedings of The IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), IEEE,2001, Vol.1.1. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517
[8] T. Ojala, M. Pietikäinen and D. Harwood, "Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions," Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, vol. 1, pp. 582-285, 1994
[9] K. S. Chidanand Kumar, Brojeshwar Bhowmick, An Application for Driver Drowsiness Identification based on Pupil Detection using IR Camera, Intelligent Human-ComputerInteraction, pp 73-82 (2019).
[10] K. Fornalczyk and A. Wojciechowski, "Robust face model based approach to head pose estimation," Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), p. 1291, 2017.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Tekstil Arşimet Spiral Anten Tasarımı

Mehmed Yasin Otlu[a], İbrahim Faruk Çolak[b], Alper Çalışkan[b], Nurhan Türker Tokan[b]*

[a]Baykar Teknoloji, Özdemir Bayraktar Milli Teknoloji Merkezi, İstanbul/Türkiye.
[b]Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** yasin.otlu@std.yildiz.edu.tr

ÖZET

Günümüz kablosuz haberleşme ve radar uygulamalarında antenlerin geniş bant ve yüksek kazanç isterlerini sağlaması sistem performansı açısından önem arz etmektedir. Doğrusal polarize antenler, nesnelerin yüksek doğrulukla tespiti ve sınıflandırılması için uygun değildir. Kablosuz bağlantı verimliliğini iyileştirmek ve polarizasyon hizalamasından dolayı oluşan kayıpları minimize etmek için dairesel polarize antenler kullanılmalıdır. Radar uygulamalarında, geniş frekans bandına ve dairesel polarizasyona sahip olmaları nedeni ile spiral antenler önemli rol almaktadır. Spiral antenlerin çapı, en düşük çalışma frekansına göre belirlenmektedir. Bu durum antenin boyutlarının oldukça büyük olmasına sebebiyet verir. Büyük boyutlu antenlerin saha uygulama alanlarındaki kullanımı zordur ve taşınma dayanıklılığı azdır. Bu çalışmada, arama-kurtarma radarlarında kullanılması önerilen, 150 MHz – 950 MHz frekans aralığında çalışan, düşük eksenel oranlı, yüksek kazançlı ve tekstil malzemeler kullanılarak üretilen Arşimet spiral anten önerilmiştir. Spiral antende ışımanın tek yöne olması için kullanılan alt taban yansıtıcı yüzey ve spiral desen, lazer kesim kalıp kullanılarak düşük özdirence sahip iletken bant entegrasyonu ile sağlanmıştır. Spiral antenin giriş empedansı ile 50Ω'luk konektör arasında elektronik balun kullanılarak empedans uyumu sağlanmıştır. Alt ve üst yüzey arasındaki boşluk kısım strafor köpük ile doldurulmuştur. Tekstil spiral antenin rahat taşınımı ve çevresel faktörlerden etkilenmemesi adına kumaş kılıf üretimi yapılmış ve antene giydirilmiştir. Anten üretilmiş; benzetim/ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Arşimet Spiral, Balun, Spiral Anten, Tekstil Anten, Tekstil Malzeme.*

Textile Archimedean Spiral Antenna Design

ABSTRACT

In today's wireless communication and radar applications, it is important for antennas to meet broadband and high gain requirements for system performance. Linear polarized antennas are not suitable for detection and classification of objects with high accuracy. Circularly polarized antennas should be used to improve wireless link efficiency and minimize losses due to polarization alignment. Spiral antennas play an important role in radar applications due to their wide frequency band and circular polarization. The diameter of spiral antennas is determined according to the lowest operating frequency. This causes the antenna to become quite large in size. Large-sized antennas are difficult to use in practical application areas and have low durability. In this work, a textile Archimedean spiral antenna that operates in the frequency range of 150MHz-950MHz with low axial ratio and high gain is proposed for search and rescue radars. The radiating surface of the spiral antenna and the bottom base reflective surface that provides unidirectional radiation are formed with conductive tape. The space between the upper and lower surface is filled with styrofoam. A fabric cover is used to ensure light weight, portability and durability. The antenna is fabricated. Simulation and measured results of the antenna are given comparatively.

Keywords: *Archimedean Spiral, Balun, Spiral Antenna, Textile Antenna, Textile Material.*

I. GİRİŞ

Yüzey altı görüntüleme radarlarında geniş bantlı anten kullanımı, radar algoritmasının yüksek çözünürlükte nesne tespitine olanak sağlamaktadır. Ayrıca hedef cismin tespiti, yüksek kazançlı ve dairesel polarizasyona sahip anten kullanılarak en az kayıpla gerçekleştirilebilmektedir. Bu uygulamalarda geniş bant ve dairesel polarizasyon özelliklerine sahip spiral antenler önemli rol almaktadır. Spiral antenlerin çapı, en düşük çalışma frekansına göre belirlenmektedir. Bu durum anten boyutlarını büyük hale

getirmektedir. Boyutu büyük ve sert dielektrik malzemelerden üretilen antenlerin saha uygulamalarında kullanımı zordur. Tekstil malzemeler kullanılarak yüzeye uyumlu, taşınma dayanıklılığı yüksek, saha koşullarına uygun anten tasarımları gerçekleştirilebilmektedir.

Spiral antenler, farklı geometrik yapılara sahiptirler. Geometrik yapıları, anten performansları üzerinde etkilidir. Arşimet spiral antenler, genel çalışma performansı ve geometrisinden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. 2001 yılında yapılan bir çalışmada, Arşimet spiral anten tasarım teorisi sunulmuş ve anten parametrelerinin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir [1]. İki kollu geometriye sahip Arşimet ve eşkenar üçgen spiral antenlerin karşılaştırmalı analizi toprak tabanlı ve toprak tabansız olacak şekilde sunulmuştur [2]. Geniş bantlı spiral antenlerin frekans bağımsızlığını daha iyi hale getirebilmek mümkündür. Bu amaç ile yapılan bir çalışmada, log periyodik anten tasarımlarında uygulanan yaklaşım ile dikdörtgen spiral anten tasarımı tanıtılmıştır [3]. Önerilen çalışmada, geleneksel dikdörtgen spiral antene göre frekansa daha az bağımlı olduğu sonucuna varılmıştır. Babinet teoremine göre spiral antenlerin giriş empedansı 188.5 Ω olarak belirlenmektedir. RF çalışmalarında genellikle 50 Ω sistem empedansı kullanılmaktadır. Spiral anten giriş empedansı ile RF sistem empedansı arasındaki uyumlama işlemini balun elemanı gerçekleştirmektedir. Spiral antenin dengeli besleme hattı ile dengesiz koaksiyel hat arasındaki uyumlama, balun tasarımı yapılarak gerçekleştirilmiştir [4]. Spiral anten, 1.75 – 15 GHz kabul edilebilir geri dönüş kaybını sağlamaktadır. Balunlar, spiral anten yüzeylerine genellikle dikey olacak şekilde entegre edilir. Ancak tasarım karmaşıklığını azaltabilmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. 2019 yılında yapılan bir çalışmada, geniş bantlı spiral anten tasarımı verilmiştir [5]. Tasarımda kullanılan balun, antene paralel konumlandırılmıştır. 1 – 3.5 GHz aralığında 3 dB'nin altında eksenel oran değeri gözlenmiştir. Spiral antenlerde boşluk destekli yapı ile toprak düzlemli alt taban kullanılarak ışımanın tek yöne olması ve anten kazancının arttırılması sağlanmaktadır. Yapılan başka bir çalışmada, dikdörtgen spiral anten, alt taban yansıtıcı düzlemsel yapı ile desteklenerek kazancın arttırımı sağlanmıştır [6].

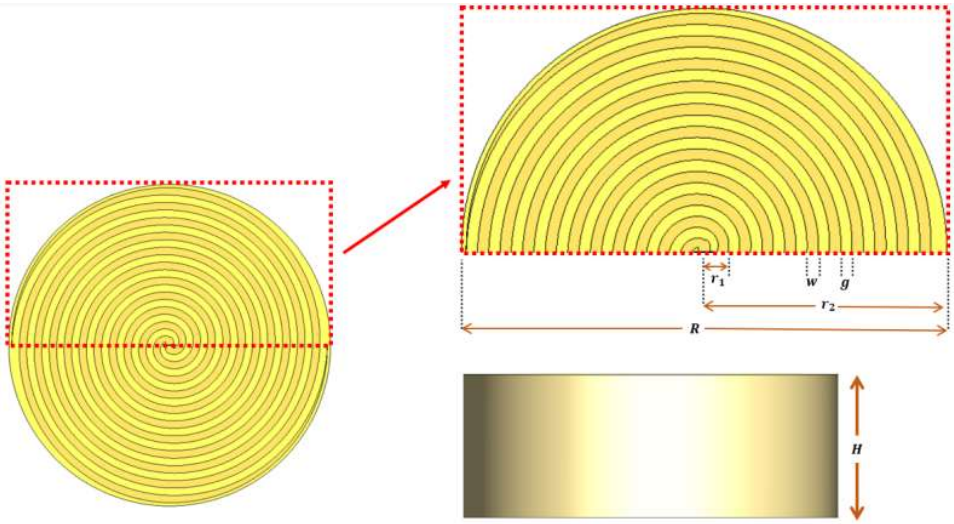
Tekstil malzemelerden üretilen antenlerin geleneksel antenlere göre daha esnek ve çalışılan fiziksel alana daha uyumlu olması, anten üretiminin tekstil malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmesini desteklemektedir. Tekstil anten tasarımlarında alt tabaka olarak kullanılan dielektrik malzemelerin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır [7]. Bir başka çalışmada iletken tekstil iplikler kullanılarak üretilen spiral anten önerilmiştir [8]. Sunulan antende 1-3 GHz frekans aralığında 6.5 dBi kazanç elde edilmiştir. Yüksek mukavemetli kevlar malzemesi üzerine düşük yüzey direncine sahip iletken lifler, standart dikiş makinası kullanılarak işlenmiş ve 0.3-3 GHz frekans aralığında 6.5 dBi kazanç değerine sahip hafif tekstil spiral anten sunulmuştur [9]. 5 dönme tur sayısına sahip kenar beslemeli Arşimet spiral anten, gümüş iletken ipliklerin saten kumaşa dikilmesi ile elde edilmiştir [10]. Anten, 2 - 6 GHz frekans aralığını desteklemektedir. 2013 yılında yapılan bir çalışmada, esnek Zylon liflerine gümüş kaplama yapılarak yüzeye uyumlu spiral anten tasarımı sunulmuştur [11]. 300 - 3000 MHz aralığında dairesel polarizasyon özelliğini gösteren anten, 700 - 2000 MHz frekans aralığında 5 dBi kazanç sağlamaktadır. Yapılan başka bir çalışmada, iletken bölüm için paslanmaz çelik iplikleri, alt tabaka için ise keçe kumaşı kullanılarak Arşimet spiral anten üretilmiş ve geniş bant RF hasatlama sisteminde kullanılması için önerilmiştir [12].

Bu çalışmada, 150 MHz – 950 MHz frekans aralığında çalışan, düşük eksenel oranlı, yüksek kazançlı ve tekstil malzemeler kullanılarak üretilen Arşimet spiral anten sunulmuştur. Antende tek yöne ışımayı sağlamak için iletken banttan oluşan reflektör yüzey oluşturulmuştur. Spiral antenin giriş empedansı ile 50Ω'luk konektör arasında elektronik balun kullanılarak empedans uyumu sağlanmıştır.

II. MATERYAL-METOT

A. Tekstil Arşimet Spiral Anten Tasarımı

İki kollu Arşimet spiral anten tasarımında iletken kol genişliği, iki iletken kollar arasındaki boşluk, spiralin iç-dış yarıçapı, anten giriş empedansı ve dönme tur sayısı önemli parametrelerdir. Şekil 1'de tasarlanan antenin parametre bilgileri gösterilmiştir.



Şekil. 1 Tekstil Arşimet spiral anten tasarımı

Spiral antenin en yüksek çalışma frekansı eşitlik 1 ile hesaplanır.

$$f_H = \frac{c}{2\pi r_1} \tag{1}$$

Burada c ışık hızı, r_1 ise antenin iç yarıçapını belirtmektedir. Antenin çalışacağı en düşük frekans, eşitlik 2 ile verilmektedir.

$$f_L = \frac{c}{2\pi r_2} \tag{2}$$

r_2 antenin dış yarıçapını ifade etmektedir. Eşitlik 3 ile belirtilen w, spiral kol genişliği; g ise iki iletken spiral kolların arasında kalan boşluğu tanımlamaktadır. İki kollu spiral anten yapısı kendi kendini tamamlayan bir geometriye sahip olduğu düşünüldüğünde kol genişliği ve boşluk kısmı eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$w = g = \frac{r_2 - r_1}{4N} \tag{3}$$

Babinet teoremini göre spiral anten giriş empedansı eşitlik 4 ile verilmektedir.

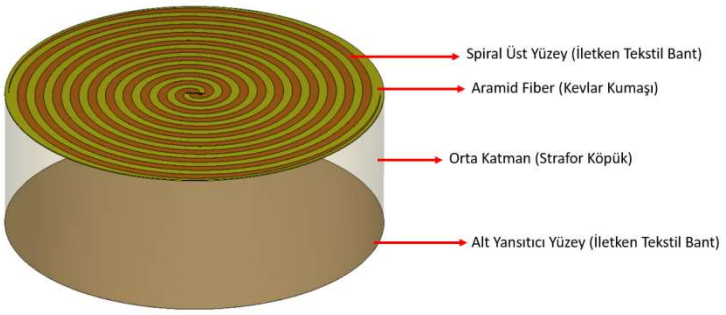
$$Z_{in} = \frac{\eta_0}{2} = \frac{120\pi}{2} = 188.5\ \Omega \tag{4}$$

Tablo 1 ile tekstil Arşimet spiral antenin tasarım parametreleri ve değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Tekstil Arşimet spiral anten tasarım parametreleri ve değerleri

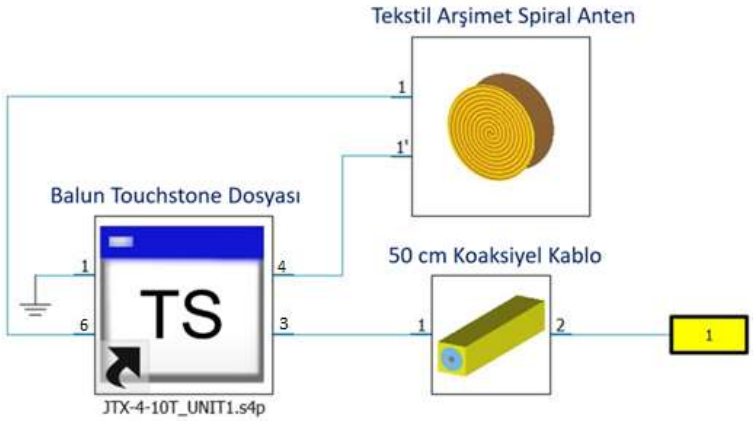
Parametre	**Tanım**	**Değer [mm]**
R	Spiral ve Yansıtıcı Yüzey Çapı	710
H	Spiral ve Yansıtıcı Yüzey Arası Mesafe	270
r_1	Spiral İç Yarıçapı	45
r_2	Spiral Dış Yarıçapı	348
w	Spiral Kol Genişliği	15.5
g	Spiral Kollar Arası Mesafe	15.5
N	Dönme Tur Sayısı	5

Tekstil Arşimet spiral anten tasarımında kullanılan malzeme bilgisi Şekil 2'de verilmiştir. Tasarım, CST benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir [13]. Anten yapısı incelendiğinde, spiral üst yüzey ve alt yansıtıcı yüzey iletken bant, spiral desenin entegre edileceği yüzey aramid fiber (kevlar), orta katman ise dielektrik sabiti düşük strafor köpük olacak şekilde malzeme tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil. 2 Tekstil Arşimet spiral anten katman yapısı

50 – 1000 MHz aralığında çalışan, küçük boyutlu ve düşük iletim kaybına sahip JTX-4-10T+ üretici kodlu balun kullanılarak anten yapısının kompakt ve sağlam olması sağlanmıştır. Balun entegresinin 1 ve 3. pinleri 50 Ω, 4. ve 6. pinleri ise 200 Ω olacak şekilde belirtilmiştir [14]. Şekil 3'te benzetim ortamında tekstil spiral anten sisteminin tasarımı verilmiştir. Benzetim sonuçları, ölçüm sonuçları bölümünde değerlendirilmiştir.



Şekil. 3 Tekstil Arşimet spiral anten sistem tasarımı

B. Üretim Süreci

Anten üretimi, spiral anten üst yüzeyi, yansıtıcı alt yüzeyi, orta katman ve balun entegresi olmak üzere dört parçaya ayrılmıştır. Spiral üst yüzey, lazer kesim spiral kalıp çıkartılarak spiral desen üzerinde iletken bant entegrasyonu ile sağlanmıştır. Desen üzerindeki yüzey direnç değerleri, en düşük 0.3 Ω, en yüksek 27 Ω olarak ölçülmüştür. Şekil 4'te spiral desen verilmektedir.



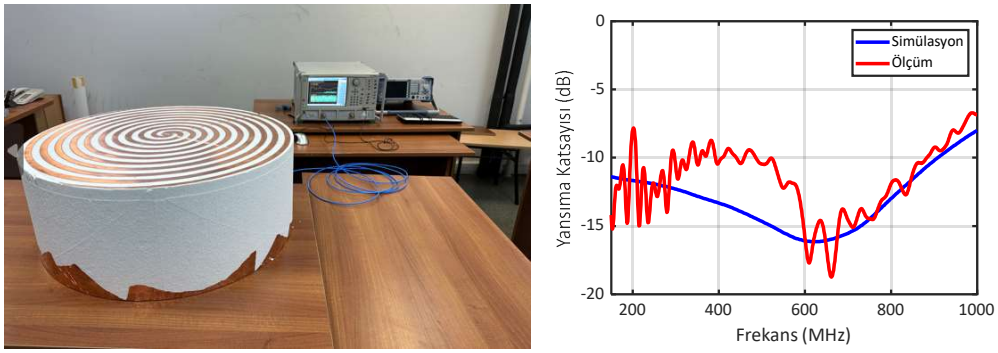
Şekil. 4 Spiral desenin hazır hale getirilmesi

Orta katmanda silindir strafor köpük malzemesi kullanılarak dielektrik sabitinin düşük seviyede tutulması sağlanmıştır. Yansıtıcı alt yüzey, strafor köpük tabanının iletken bant kaplanması ile elde edilmiştir.

Elektronik balun entegrasyonu kapsamında, balun 50 Ω pin tarafı RF kablonun canlı uç ve şasesine, diferansiyel 200 Ω pin tarafı ise spiral kolların besleme uçlarına bağlanmıştır. Orta katmanda kullanılacak köpüğün merkez noktasına balun yerleşimi gerçekleştirilmiştir.

C. Ölçüm Sonuçları

Strafor köpük ile üretilen tekstil spiral antenin yansıma katsayısı, kazanç, eksenel oran ve ışıma örüntüsü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, benzetim ortamında yapılan tasarım sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5'te yansıma katsayısı ölçüm düzeneği ve sonuçları gösterilmektedir.



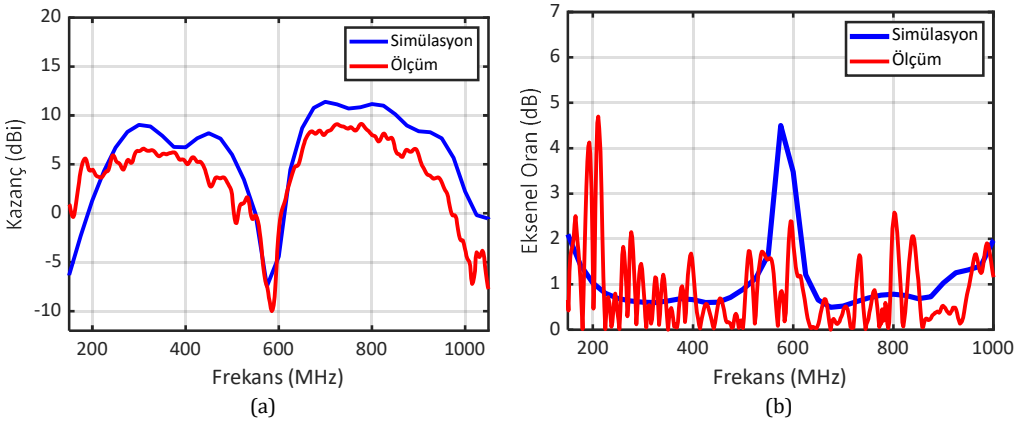
(a) (b)

Şekil. 5 Spiral antenin tekstil kılıf giydirilmeden önce ölçümü (a) ölçüm düzeneği (b) yansıma katsayısı

Grafik incelendiğinde 300-550 MHZ aralığında ölçüm ve simülasyon sonucu arasında 3 dB mertebelerinde farklılık olduğu gözlenmiştir. Diğer frekans aralıklarında ise birbirini takip eden sonuç elde edilmiştir. Tekstil spiral antenin rahat taşınımı ve çevresel faktörlerden etkilenmemesi adına kılıf üretimi yapılmış olup tekstil spiral antene giydirilmiştir. Tekstil spiral antenin kılıf girdirildikten sonraki görünümü Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil. 6 Spiral antenin tekstil kılıf giydirildikten sonra görünümü

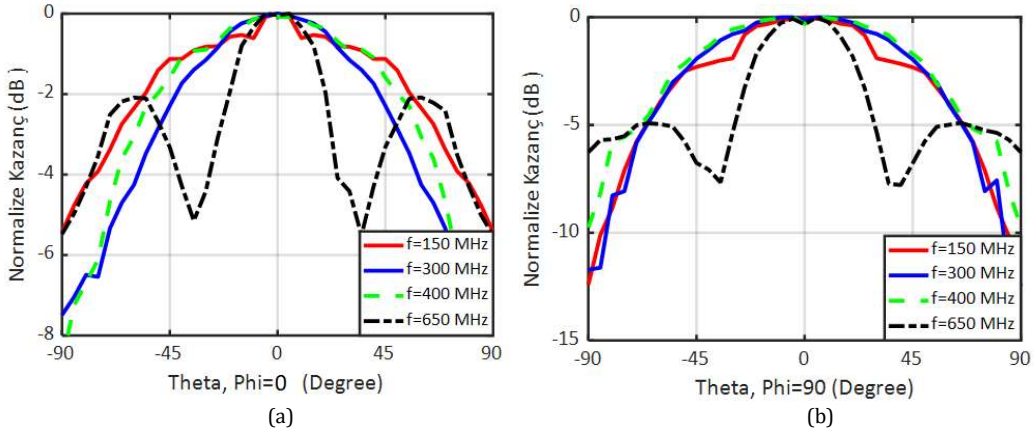


(a) (b)

Şekil. 7 Kazanç ve eksenel oranın frekansla değişimi (a) kazanç (b) eksenel oran

Tekstil spiral anten kazanç ve eksenel oran grafiği Şekil 7'de verilmektedir. Ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında kazanç eğrilerinin benzer karakteristik gösterdiği görülmektedir. Test

ortamından kaynaklı kazanç düşüşlerinin olabileceği göz önüne alındığında sonuçların makul seviyede olduğu değerlendirilmiştir. 150 - 250 MHz frekans aralığında eksenel oranın 4-5 dB mertebelerinde olduğu gözlenmiştir. 250 - 1000 MHz frekans aralığında eksenel oranın 3 dB değerinin altında olduğu görülmüştür. Şekil 8'de $\varphi = 0^o$ve $\varphi = 90^o$'de 150 MHz, 300 MHz, 400 MHz ve 650 MHz frekanslarında ölçülen normalize edilmiş kazanç sonuçları verilmektedir.



(a) (b)

Şekil. 8 Normalize edilmiş kazanç ölçüm sonuçları (a) $\varphi = 0^o$ düzlemi (b) $\varphi = 90^o$ düzlemi

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tekstil malzemeler kullanılarak saha uygulamalarında yüzeye uyumlu, taşınma dayanıklılığı yüksek, hafif ve çevresel faktörlerden en az şekilde etkilenebilecek anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Anten 150 - 950 MHz aralığında kabul edilebilir seviyede geri dönüş kaybına sahiptir. Eksenel oran değeri, 150 - 250 MHz frekans aralığı haricinde bant boyunca 3 dB'nin altında olduğu gözlenmiştir. Kazanç, 230 - 430 MHz ve 630 - 900 MHz aralıklarında 5 dBi değerinin üzerinde olduğu; 590 MHz merkez frekansında ise dip yaptığı gözlenmiştir. Frekans spektrumu boyunca en yüksek kazanç değeri ise 700-800 MHz mertebelerinde 8 dBi ile elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 121E409)

KAYNAKLAR

[1] E. D. Caswell, *Design and Analysis of Star Spiral with Application to Wide-band Array with Variable Element Sizes*. Virginia Tech, 2001

[2] N. I. Ooi et al., "Performance comparison between archimedean and equiangular spiral antenna," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering,* vol. 9, pp. 105–109, 2017.

[3] U. Saynak, A. Kuştepeli, "Dikdörtgen spiral anten tasarımında yeni bir yaklaşım," in *ELECO Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, ELECO, 2006, pp. 554–556.

[4] J. Coetzee, D. Jayalath, K. Vinayagamoorthy, "*Microstrip to parallel strip balun as spiral antenna feed*," in *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC)* Spring, 2012, pp. 1–5.

[5] K. Vınayagamoorthy, *Design and Implementation of Wideband Baluns for Archimedean Spiral Antennas*. Queensland University, 2011.

[6] J. Ely, C. Christodoulou, D. Shivel, "Square spiral microstrip antennas for wireless applications," in *Microwave Systems Conference*, IEEE NTC 95, 1995, pp. 229–232.

[7] R. Salvado et al., "Textile materials for the design of wearable antennas: A survey," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 12, pp. 15 841–15 857, 2012.

[8] J. Zhong et al., "Conformal load-bearing spiral antenna on conductive textile threads," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 230– 233, 2017.

[9] J. Zhong, A. Kiourti, J. L. Volakis, "Conformal, lightweight textile spiral antenna on kevlar fabrics," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2015, pp. 1988–1988.

[10] M. Kohli, C. Bartone, "An e-textile edge-fed spiral antenna for flexible wearable applications," *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1827–1828, 2016

[11] Z. Wang, L. Z. Lee and J. L. Volakis, "A 10:1 bandwidth textile-based conformal spiral antenna with integrated planar balun," *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando, FL, USA,* 2013, pp. 220-221

[12] R. M. E. Khosht et al., "A foldable textile-based broadband archimedean spiral rectenna for rf energy harvesting," in *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2016*, pp. 1–4.

[13] CST Microwave Studio, http://www.cst.com, CST GmbH, Darmstadt, Germany.

[14] *JTX-4-10T+ Transformer.* [Online]. Available: https://www.minicircuits.com/ (visited on 15/12/2023)

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Uzun Mesafe İletimi İçin En Uygun Yöntemin Belirlenmesi: Hibrit WDM PON ve QAM-OFDM PON Tekniklerinin Uygulanması

Mehmet Latif ALKAN[a], Nisa NACAR ÇIKAN[a], Murat AKSOY[a]*

[a]Çukurova Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** ncikan@cu.edu.tr

ÖZET

4K/8K UHD, akıllı fabrika, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve nesnelerin interneti (IoT) gibi teknolojilerin ortaya çıkmasıyla veri trafiği artmakta ve yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. 5G ve 6G gibi mobil teknolojilerin de giderek yaygınlaşmasıyla, veri yükünün ve trafiğinin kesintisiz olarak taşınabilmesi için en uygun Pasif Optik Ağ (PON) teknolojisi kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada Zaman Bölmeli Çoğullamalı (TDM) PON, Dalga Boyu Bölmeli Çoğullamalı (WDM) PON ve Dik Frekans Bölmeli Çoğullamalı (OFDM) PON yöntemlerinin farklı mesafelerdeki performansları Optisystem 21.0 simülasyon programı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Uzak mesafelerde düşük kayıp ve aynı zamanda uygun maliyet sağlayan teknolojinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, 10 Gbps, 512 alttaşıyıcılı 4-QAM OFDM sistemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar WDM ve QAM-OFDM tekniklerinin hibrit kullanımı ile verinin tek modlu fiber-28 linkinde 165 km'ye kadar kaliteli ve kayıpsız olarak iletildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: QAM-OFDM, PON, TDM, WDM

Determination of the Most Suitable Method for Long-Haul Transmission by Applying hybrid WDM PON and QAM-OFDM PON Techniques

Mehmet Latif ALKAN[a], Nisa NACAR ÇIKAN[a], Murat AKSOY[a]*
[a]Çukurova University, Engineering Faculty, Department of Electrical-Electronics Engineering, Adana/Türkiye.
* **Corresponding Author:** ncikan@cu.edu.tr

ABSTRACT

With the emergence of technologies such as 4K/8K UHD, augmented reality, smart factories, virtual reality, , and the Internet of Things (IoT), data traffic is increasing, necessitating high bandwidth. As 5G and 6G mobile technologies become increasingly widespread, efforts are being made to use the most suitable Passive Optical Network (PON) technology to ensure uninterrupted transmission of data traffic. In this study, the performances of Time Division Multiplexed (TDM) PON, Wavelength Division Multiplexed (WDM) PON, and Orthogonal Frequency Division Multiplexed (OFDM) PON methods at different distances were compared using the Optisystem 21.0 simulation program. The aim was to identify technology that provides low loss at remote distances while remaining cost-effective. A 10 Gbps, 512 subcarrier 4-QAM OFDM system was utilized in the study. The results demonstrated that the hybrid use of WDM and QAM-OFDM techniques enabled high-quality and lossless transmission of data up to 165 km over a single-mode fiber-28 link.

Keywords: QAM-OFDM, PON, TDM, WDM

I. INTRODUCTION

Today, the need for high-speed internet connection is increasing day by day due to the fact that citizens transactions, banking, online education, which were previously done through printed documents, must be done via the internet and due to the rapid developments in the digitalization process. Internet service providers (ISP) also use optical network technologies that provide wider bandwidth, higher speed and data security instead of copper cable to offer faster and more reliable internet connections to their customers. In recent years, optical network technologies, particularly PON, have gained significant importance. As we delve into the intersection of 5G and PON, it becomes evident that their integration is crucial for several reasons such as faster speeds, capacity and connectivity, enhanced mobile broadband, lower latency and adaptation into IOT devices.

5G provides significantly faster data speeds compared to 4G. It is designed to deliver maximum download rates reaching 20 Gbps and upload rates of up to 10 Gbps. This enables faster downloading and uploading of big files, high-quality videos stream without interruptions or delay, and improved overall browsing experience. 5G networks have extremely low latency, reducing the time gap between transmitting a query and obtaining a reply. This holds particular significance for applications that demand immediate responsiveness, such as autonomous vehicles, online gaming, remote surgeries, and industrial automation.

By increase in quantity of connected devices and the expanding demand for big data applications, 5G provides greater network capacity to support high concentration of connected devices. It utilizes sophisticated technologies such as Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) and beamforming to enhance network efficiency and improve the overall connectivity experience, even in crowded areas. 5G enables a more robust mobile broadband experience, delivering higher-quality streaming, smoother video calls, and better performance for bandwidth-intensive applications. It supports 4K and 8K video streaming, virtual reality (VR), augmented reality (AR), and other data-demanding applications that require a significant amount of bandwidth.

5G is expected to be a catalyst to facilitate the extensive integration of IoT devices. Its high capacity, low latency and ability to connect a massive number of devices simultaneously make it ideal for powering IoT applications. Smart homes, smart cities, industrial automation, and various other IoT use cases can benefit from the capabilities of 5G. In the IMT-2020 (International Mobile Telecommunications) specification, 5G is expected to provide remarkably higher data speeds compared to its predecessor, IMT-Advanced (4G/LTE Release 14). The maximum data rates specified for 5G are 20Gbps for the downlink (download) and 10Gbps for the uplink (upload).

Table 1. Comparison of Communication Networks

Comparison	2G	3G	4G	5G
Introduced in year	1993	2001	2009	2018
Technology	GSM	WCDMA	LTE, WiMAX	MIMO, mm Waves
Access system	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	OFDM, BDMA
Switching type	Circuit switching for voice and packet switching for data	Packet switching except for air interference	Packet switching	Packet switching
Internet service	Narrowband	Broadband	Ultra broadband	Wireless World Wide Web
Bandwidth	25 MHz	25 MHz	100 MHz	30 GHz to 300 GHz
Advantage	Multimedia features (SMS, MMS), internet access and SIM introduced	High security, international roaming	Speed, high speed handoffs, global mobility	Extremely high speeds, low latency
Applications	Voice calls, short messages	Video conferencing, mobile TV, GPS	High speed applications, mobile TV, wearable devices	High resolution video streaming, remote control of vehicles, robots, and medical procedures

There are three fundamental PON types. Figure 1 illustrates the tree topology of TDM PON. The Optical Line Terminal (OLT) transmits the downstream signal, which carries data, voice, or video traffic, over an optical fiber. This signal is then connected to an optical combiner/splitter at the CO. The optical splitter/combiner is a passive component that divides and combines the signals between the OLT and the Optical Network Units (ONU). The combiner/splitter receives the downstream signal from the OLT through a feeder optical fiber. It splits the incoming signal into multiple copies, with each copy representing a separate channel. These channels are essentially separate data streams that can be allocated to individual ONUs or groups of ONUs. [1]

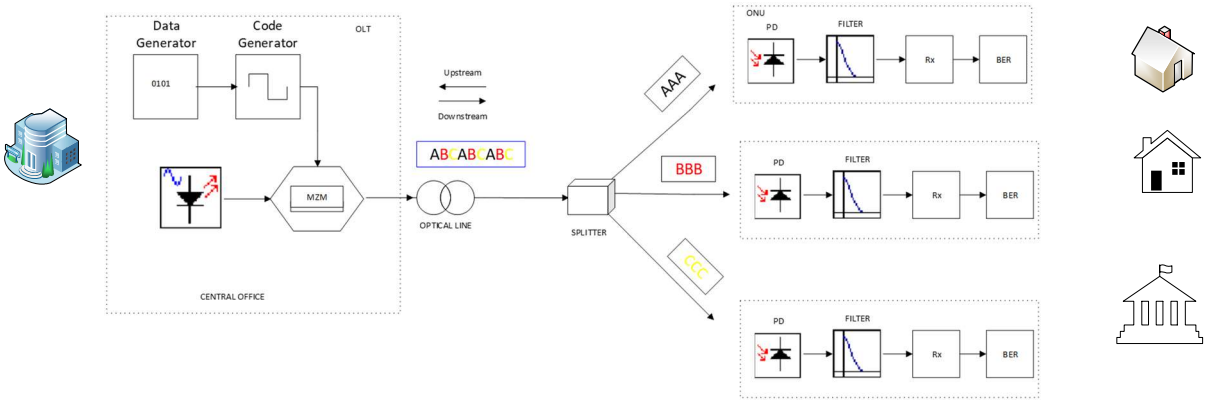


Figure 1: TDM Architecture

The incorporation of Wavelength Division Multiplexing (WDM) represents a crucial advancement in optical communications expansion. WDM's capability has offered greater flexibility to systems and streamlined network design[2]. In WDM PON, multiple wavelengths are utilized to enable simultaneous bidirectional communication, increasing the network capacity and improving performance. The basic principle behind WDM is to divide the available bandwidth of an optical fiber into multiple channels, each using a different wavelength of light. By using different wavelengths, multiple signals can be transmitted independently of each other without interfering with one another. This allows for a significant increase in the capacity of the fiber-optic network.[6]

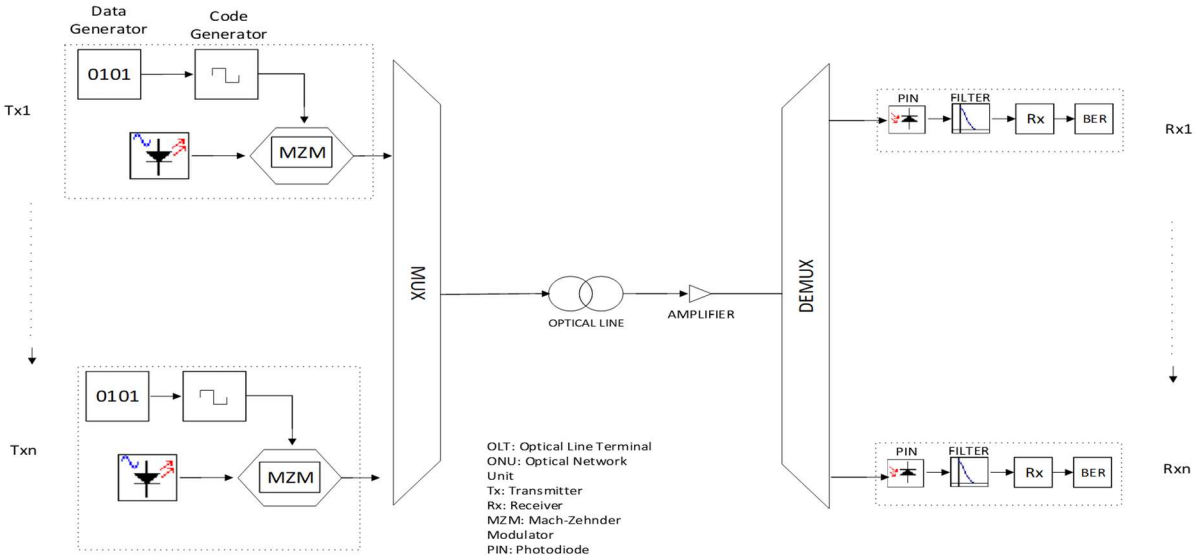


Figure 2: WDM Architecture

OFDM is a key technology in wireless communication systems due to its high data rates, robustness against fading, efficient spectrum utilization, and wide adoption in various standards. It has played a significant role in enabling the advancement of wireless technologies and meeting the increasing demands for high-speed wireless communication.[8]. The use of IFFT in the transmitter and FFT in the receiver is a distinguishing feature of OFDM. It allows for the efficient transmission and reception of multiple subcarriers simultaneously, with each subcarrier carrying independent data. The orthogonality of the subcarriers is maintained through the proper design of the subcarrier frequencies and the use of the IFFT/FFT operations, enabling high spectral efficiency and robustness against multipath fading in wireless communication systems.[9] . Figure 3 below demonstrates spectra for FDM/WDM and OFDM. In OFDM, the spectra of the subcarriers are distinct and separated from each other. This separation is achieved by carefully selecting the frequencies of the subcarriers and ensuring their orthogonality.[10] OFDM does not require analog filtering in its implementation. The use of analog filtering is not necessary in OFDM systems. Instead, OFDM relies on digital signal processing techniques for signal generation and recovery.[3,4] OFDM divides the spectrum into smaller subcarriers carrying low-rate data streams. These subcarriers are placed close together but don't interfere with each other because they are designed to be orthogonal. This combination of modulation (representing the data on each subcarrier) and multiplexing (efficiently using the spectrum with multiple subcarriers) is what makes OFDM a powerful technique. [7]

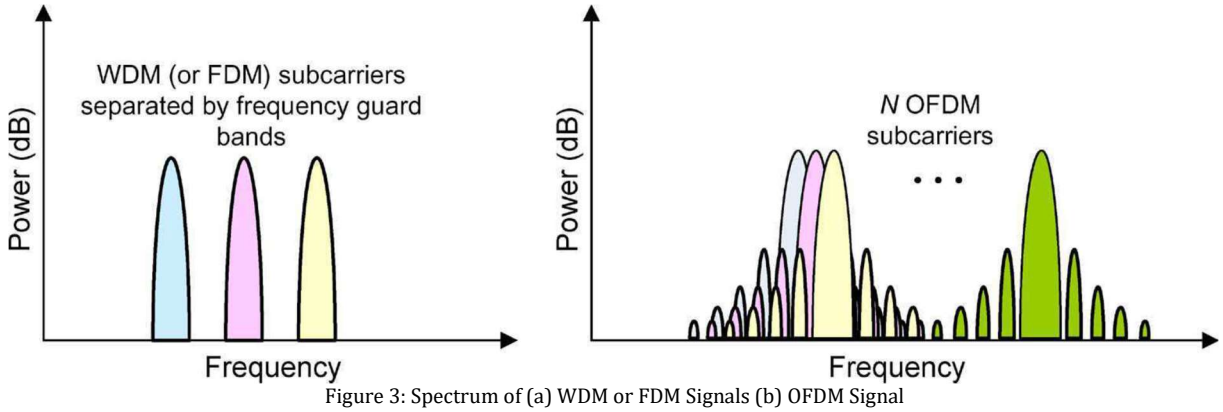


Figure 3: Spectrum of (a) WDM or FDM Signals (b) OFDM Signal

II. SIMULATION SETUP

In this study, the performances of Time Division Multiplexed (TDM) PON, Orthogonal Frequency Division Multiplexed (OFDM) PON and WDM PON methods at different distances were compared using the Optisystem 21.0 simulation program. The aim was to identify technology that provides low loss at remote distances while remaining cost-effective.

A 10 Gbps TDM PON and 4 user WDM PON simulated on the system. Different distances and bit rate signal sent via transmission link. At the receiver side by using Bit Error Rate (BER) Analyzer, received signal quality observed by reading Quality Factor (Q-Factor) and BER.

The coherent detection of a 10 Gbps, 512 subcarrier 4-QAM OFDM system involves several components: the OFDM transmitter, the optical link, optical to RF up and down-converters (RTO) and (OTR), OFDM receiver. [5] Figure 4 illustrates the architecture of this OFDM scheme.

In the OFDM transmitter, a QAM/PSK generate a bit sequence for OFDM signal. This sequence is then passed through different frequencies assigned to each subcarrier. A pseudo-random bit sequence (PRBS) generator produces a pseudo-random bit sequence that serves as the input data for the OFDM modulator. [11]

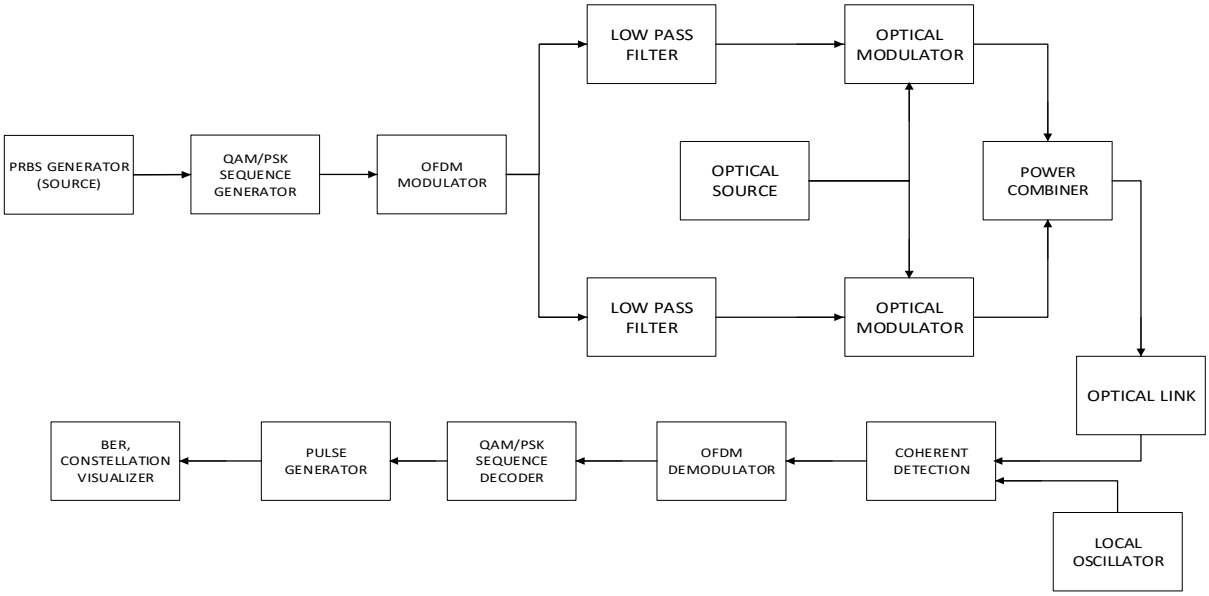
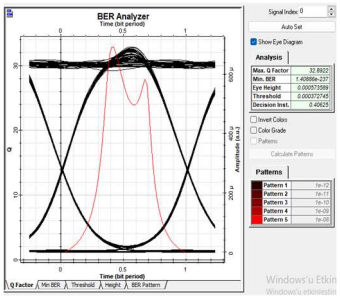


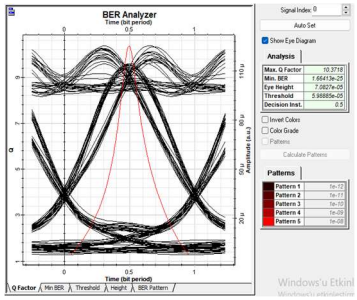
Figure 4: Coherent OFDM

III. RESULTS AND ANALYSIS

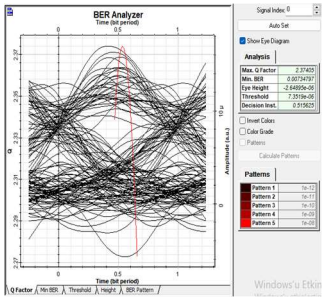
Simulation results at different distances for TDM PON, WDM PON and QAM OFDM PON are shown in Figure 5-a, 5-b and 5-c respectively. Eye diagram, Q-Factor and constellation results are listed in Table-2. Simulations are carried out by using Optisystem 21 software tool [12].



Bit Rate : 10 Gb/s
Distance :10 km

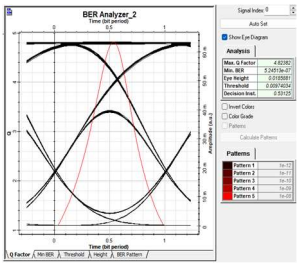


Bit Rate : 10 Gb/s
Distance : 50 km

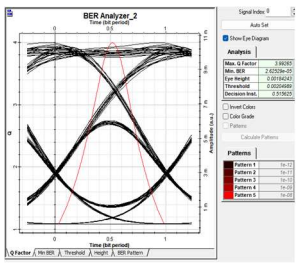


Bit Rate : 10 Gb/s
Distance : 100 km

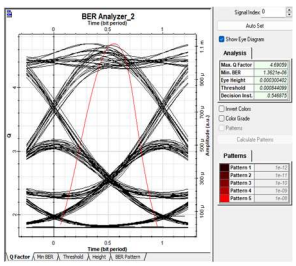
Figure 5-a: TDM PON



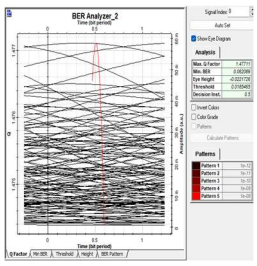
Bit Rate : 10 Gb/s
Distance :10 km



Bit Rate : 10 Gb/s
Distance : 50 km

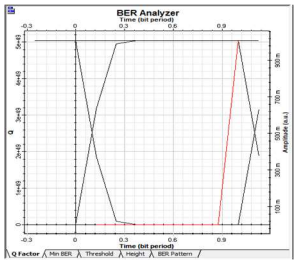


Bit Rate : 10 Gb/s
Distance : 100 km

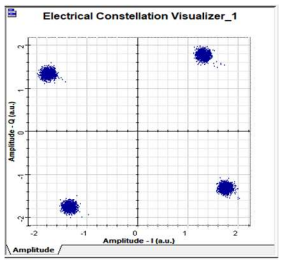


Bit Rate : 50 Gb/s
Distance : 10 km

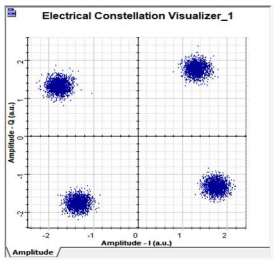
Figure 5-b: WDM PON



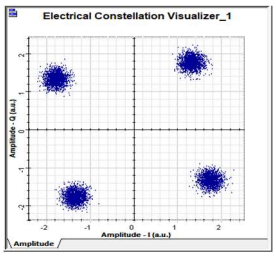
Bit Rate : 10 Gb/s
Distance :10 km



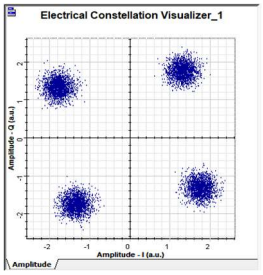
Bit Rate : 10 Gb/s
Distance :100 km



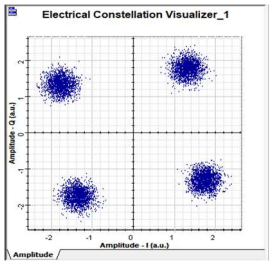
Bit Rate : 50 Gb/s
Distance : 50 km



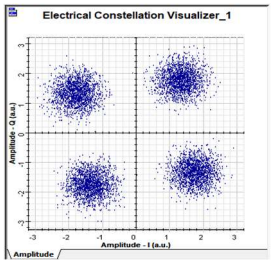
Bit Rate : 50 Gb/s
Distance : 100 km



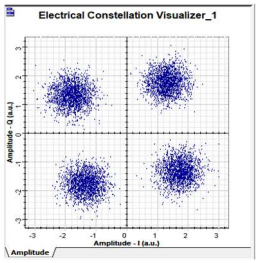
Bit Rate : 100 Gb/s
Distance : 50 km
BER=0 & Q=5e+49



Bit Rate : 100 Gb/s
Distance : 100 km
BER=0 & Q=5e+49



Bit Rate : 400 Gb/s
Distance : 400 km
BER=0 & Q=5e+49



Bit Rate : 500 Gb/s
Distance : 500 km
BER=1 & Q=0

Figure 5-c: QAM OFDM PON

Table 2. Simulation Results

10 Gb/s	TDM	WDM	4-QAM OFDM
Distance (km)	BER / Q	BER / Q	BER / Q
10	1.4e-237 / 33	5.25e-7 / 4.82	0 / 5e+49
50	1.66e-25 / 10.37	2.19e-5 / 4	0 / 5e+49
100	0.048 / 1.48	0.06 / 1.48	0 / 5e+49
400	-----	-----	0 / 5e+49
500	-----	-----	----

IV. DISCUSSION

The results provided from simulations suggests that as the optical fiber length increases, there is a greater reduction in power, resulting in a decrease in eye clearance and constellation amplitude. Figure 5 illustrates power decrease with varying length of fiber. Based on the BER values shown in Figures 5-a and 5-b, it appears that for a 10 km length of fiber, the BER diagram and constellation for each multiplexing format exhibit favorable performance.

However, as the fiber length is increased to 70-80 km, the eye diagram starts to deteriorate for both TDM and WDM. This suggests that the quality of the optical signal is negatively affected. Additionally, for TDM, the BER value significantly increases for fiber lengths ranging from 90 to 100 km. Furthermore, when the data rate is changed to 50 Gbps in WDM, the BER increases to 1, indicating a high error rate.

Based on these results, it seems that in Figure 5-c, the constellation diagram shows a relatively small increase in BER for 4-QAM OFDM over a distance of 100 km at a data rate of 10 Gbps. This suggests that, compared to other multiplexing formats, 4-QAM OFDM exhibits a better constellation with a slightly higher BER value. It can be concluded that the QAM-OFDM scheme with coherent detection performs better than other types of PONs (Passive Optical Networks) in the given scenario.

V. CONCLUSION

The study conducted demonstrated that the OFDM system easily meets the requirements of 5G according to IMT-2020 (International Mobile Telecommunications) specification.

In short distance all types of PONs are effective, TDM-PON can be preferred due to economic reasons and simplicity. In middle distances OFDM 4 QAM is prominent compared to TDM and WDM. Q-factor and Bit Error Rate (BER) parameters are decreasing with distance.

In long distances OFDM 4 QAM is dominant technique. 5G demands can be achieved by this technique. (20Gbps (downlink) and 10Gbps (uplink)). To send big amount of data, combining of OFDM and WDM techniques may be a good solution for future studies.

REFERENCES

[1] Rajalakshmi S., Srivastava A., Pandey A., "Analysis of TDM and WDM PON using Different Coding Schemes for Extended Reach", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol.11, No.7, July 2011.

[2] K. Alatawi, *et al.*, "Performance Study of 1 Tbits/s WDM Coherent Optical OFDM System," *Optics and Photonics Journal*, vol. 3, pp. 330-335, 2013.

[3] Faulkner, Michael. (2000). 'The Effect of Filtering on the Performance of OFDM Systems'. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 49. 1877 - 1884. 10.1109/25.892590.

[4] Muhammad Ibn Ibrahimy, Fowzia Akhter, Hasin Reza Siddiquei, 'Performance Analysis of OFDM-PSK System for Optimization of Fiber Optic Dispersion', European Journal of Scientific Research vol.48,no. 4, 2011, 593 - 605.

[5] W. Shieh and I. Djordjevic, "OFDM for Optical Communications," *J. Light. Technol. IEEE*, vol/issue: 27(3), pp.456, 2009.

[6] Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke, Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, and Biswanath Mukherjee, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]," J. Opt. Netw. 4, 737-758 (2005)

[7] Sadjadpour, Hamid. (2004). Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). 10.1016/B978-075067695-3/50012-4.

[8] B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, "OFDM Inspired Waveforms for 5G," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2474-2492, Fourthquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2565566.

[9] A. N. Ismail, W. Z. W. Ismail, N. A. AbdAziz, N. A. A. Hamza, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-3, September 2019

[10] N. Ahmed, T. Natarajan, and K.R and Rao, "Discrete cosine transform," IEEE Transactions on Computers, C-23(1), pp. 90-93,1997.

[11] F. Khair, F. Hario, I. W. Mustika, B Setiyanto, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 6, No. 3, June 2016, pp. 1086 ~ 1095 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v6i3.9656

[12] Optisystem21, Optiwave, 2024, https://optiwave.com/products/optisystem/

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Endüstriyel Yapılarda Betonarme Panel ve Sandviç Panel Kullanımının Araştırılması

Muhammet Abdullah ÇETİN[a], Tuncay KAP[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı Yüksek Lisans Öğrencisi, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar: m.abdullahcetin15@gmail.com**

ÖZET

Son yıllarda inşaat sektöründeki teknolojik gelişmeler toplumu ve meslek erbaplarını heyecanlandırmıştır. Teknolojik gelişmelerin yapının görünen yüzüne yani cephelerine yansıması insanlarda tatmin edici duygulara neden olmuştur. Malzemeden tekniğe, işlevden koruma alanlarına kadar birçok alandaki yaşanan hızlı gelişimler mimarinin ilgi alanında katkı almıştır. Bu bağlamda Endüstriyel yapılarda özelikle gelişme kaydeden kısımlardan biri cephelerdir. Teknoloji ile beraber Endüstriyel yapıların cephelerinde sayısız türde malzeme, kendine has uygulama teknikleriyle karşımıza çıkmaktadır. Son çeyrek asırdır yaygın olarak kullanılan malzemelerden beton cepheler ve sandviç panel cepheler bu araştırmanın konusu olacaktır. Bu amaçla Endüstriye yapılarda betonarme panel ve sandviç panel uygulamaları incelenmiştir. Günümüzde teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin mimariye etkileri yadsınamaz. Özellikle gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemizde bu durum son yıllarda dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır. Mimarinin bütün insanlığa yüzünü gösterdiği kısım yapının cepheleridir. Malzemeden tekniğe, işlevden koruma alanlarına kadar birçok alandaki yaşanan hızlı gelişimler mimarinin ilgi alanında katkı almıştır. Bu bağlamda Endüstriyel yapılarda özelikle gelişme kaydeden kısımlardan biri cephelerdir. Teknoloji ile beraber Endüstriyel yapıların cephelerinde sayısız türde malzeme, kendine has uygulama teknikleriyle karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılan malzemelerden beton cepheler ve sandviç panel cepheler bu araştırmanın konusu teşkil etmektedir. Bu araştırmalar sonucunda uygulamada karşılan sorunlar ve çözüm önerileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Betonarme panel, Endüstriyel yapılar, Sandviç panel.*

Research on the Use of Reinforced Concrete Panels and Sandwich Panels in Industrial Buildings

ABSTRACT

In recent years, technological developments in the construction industry have excited society and professionals. The reflection of technological developments on the visible face of the building, that is, its facades, has caused satisfactory feelings in people. Rapid developments in many areas, from materials to techniques, from function to conservation areas, have contributed to the field of interest in architecture. In this context, one of the parts that are particularly developing in industrial buildings is the facades. With technology, countless types of materials appear on the facades of industrial buildings with their own application techniques. Concrete facades and sandwich panel facades, which are widely used materials for the last quarter century, will be the subject of this research. For this purpose, reinforced concrete panel and sandwich panel applications in industrial buildings were examined. Today, the effects of technological and industrial developments on architecture cannot be denied. This situation has reached remarkable levels in recent years, especially in our country, which is among the developing countries. The part where architecture shows its face to all humanity is the facades of the building. Rapid developments in many areas, from materials to techniques, from function to conservation areas, have contributed to the field of interest in architecture. In this context, one of the parts that are particularly developing in industrial buildings is the

facades. With technology, countless types of materials appear on the facades of industrial buildings with their own application techniques. Concrete facades and sandwich panel facades, which are widely used materials recently, are the subject of this research. As a result of these researches, problems encountered in practice and solution suggestions were tried to be determined.

Keywords: *Reinforced concrete panel, Industrial buildings, Sandwich panel.*

I. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz yüzyılın imkânları tahmin edemeyeceğimiz hızda artmaktadır. Her zaman hayatımızda olan bu ivmeyle beraber dilimizdeki fen kavramı, teknoloji kavramına evrilmiştir. Bütün alanlarda olduğu gibi teknoloji, yapı sektöründe de karşımıza çıkmaktadır. Zaman, yapı sektöründe kullanılan malzemelerden bekleneni artırmaktadır. Malzemelerin işlevleri gün geçtikçe artırılmaya çalışılmaktadır.

Günümüzde teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin mimariye etkileri yadsınamaz. Özellikle gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemizde bu durum son yıllarda dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır. Mimarinin bütün insanlığa yüzünü gösterdiği kısım yapının cepheleridir.

Özellikle endüstriyel yapıların Sanayi Devrimi aracılığıyla dünya çapında yaygınlaşması ilerleyen yüzyıllarda makineleşmenin ülkemiz sahalarına da gelmesini sağlamıştır. Cumhuriyetin ilanından itibaren ilk etapta devlet eliyle girişimde bulunulan endüstri yapıları ve kompleksleri ülkemiz için ilkleri oluşturmuştur. Buna binaen günümüze kadar endüstriyel yapılarda mimari anlamda gelişmeler yaşanmıştır. Malzemeden tekniğe, işlevden koruma alanlarına kadar birçok alandaki yaşanan hızlı gelişimler mimarinin ilgi alanında katkı almıştır. Bu bağlamda Endüstriyel yapılarda özelikle gelişme kaydeden kısımlardan biri cephelerdir. Teknoloji ile beraber Endüstriyel yapıların cephelerinde sayısız türde malzeme, kendine has uygulama teknikleriyle karşımıza çıkmaktadır. Son çeyrek asırdır yaygın olarak kullanılan malzemelerden beton cepheler ve sandviç panel cepheler bu araştırmanın konusu olacaktır.

II. ENDÜSTRİYEL YAPILAR NEDİR?

İnsanoğlu dünyaya ayak bastığından beri hayatını devam ettirmek için farklı nitelikte ürünler ortaya koymakta ve bunları kullanmaktadır. Bu açıdan bakarsak oldukça kapsamlı ve geniş bir mefhum olarak gördüğümüz endüstri; ürün hammaddelerinin işlenmiş halinin eldesi için uygulanan faaliyetin ve bu faaliyeti hayata geçirmek için gereken alet ve makinelerin bütünüdür. (1).

Endüstrileşmenin sürecine baktığımızda el ile yapılagelen üretimin, inorganik diyebileceğimiz güç membaları ile makinelere geçmesi ve fabrika sistemine doğru geçiş olarak tanımlanabilmektedir. (2).

18. Asrın sonlarına doğru İngiltere'de ortaya çıkan Endüstri Devrimi, insanoğlunun tarihi boyunca en önemli mihenk taşlarından biridir. İnsanın ve hayvanların fiziksel gücüne dayanmış üretme biçiminden, makine üretiminin baskın olduğu sisteme geçiş ile beraber tam mamul haline gelmiş ürün sayısı artmış, üretim modellerinde çeşitlenme ve miktarında da önemli ölçüde gelişme gözlemlenmiştir. (3).

Endüstri kavramı yaygınlaştığında bu sisteme dayanan üretime geçmezden evvel, insanoğlu üretimlerinin büyük kısmını kendi evlerinde, derme çatma atölyelerinde veya el tezgâhlarında küçük ölçeklerde gerçekleştirmiştir. Endüstri Devrimi ile beraber üretim küçük ölçekte ve yaygın olduğu bireysel sahalardan çıkıp, fabrika binalarında yapılmaya başlanmıştır. Dünya üzerindeki medeniyetlerin hayat tarzları değişmiş, geleneksel bakış ortadan kalkmış yerini ise rasyonel bakış açısı almıştır. Endüstri Devrimi ile beraber teknolojik atılımların da etkisiyle beraber yaşamın birçok alanında değişmeler ve dönüşümler meydana gelmiştir. İşte bu durum Mimarlık sahasını doğrudan etkileyen bir durum olarak karşımıza çıkmıştır. Teknoloji ile beraber yapı malzemelerindeki gelişimler, modern mimarlığın temellerinin atılmasında büyük rol oynamıştır. Bunun üzerine esasen endüstri mirası dediğimiz mefhumu oluşturan "Endüstri Yapıları" inşa edilmeye başlanmış ve yaygınlaşmıştır. (4)

III. ENDÜSTRİYEL YAPILARDA PREKAST BETONARME CEPHE PANELLERİ KULLANIMI

3.1. Prekast Betonarme Cephe Paneli Nedir?

Yapı sektöründe prekast kavramı önceden hazırlanmış bütün elemanları ifade etmektedir. Günümüzde ülkemiz sahasında prekast yapı elemanlarının önemli bir çoğunluğu beton esaslıdır demek yanlış

olmayacaktır. Yapılarda kullanılan beton prekast elemanların da çoğunluğu duvar görevi gören elemanlardır. Özellikle toplu konut ve endüstriyel yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu elemanlar genellikle panel formunda imal edilirler. Betonarme veya beton katman komplekslerinden oluşan, şantiye sahasına hazırlandıktan sonra getirilen endüstriyel yapılarda çoğunlukla cephe paneli olarak karşımıza çıkan elemanlardır. Ayrıca bu paneller şantiyede sahasında imal edildikten sonra da montaja geçilebilir.

Betonarme cephe paneli üretilirken genellikle betonarme veya beton karışıma, çeşitli kimyasal içerikleri barındıran yalıtım karışımı da eklenir. Bu sayede yalıtımlı prekast beton cephe elemanlarının üretimi gerçekleşmiş olur. Esasen yalıtım montajdan sonra da yapılabilir fakat bu şekilde karışımları bir araya getirmek çok daha iyi yalıtım sağlar ayrıca daha uzun ömürlüdür. Bu durum bize prekast beton panellerinin duvar elemanı olarak imal edilmesi bir Yana kaplama ve yalıtım özelliklerini de taşıyabileceğini göstermektedir. Prekast betonarme panellerin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Zamandan tasarruf sağlaması,
- Birden çok katmanı varsa bütün katmanlarının üretiminin ve işlenmesinin birlikte yapılabilmesi
- Şantiye sahasında montajda fazlasıyla kolaylık sağlaması, bu sayede özellikle büyük çaplı projelerde süre ve işçilik açısından büyük avantajlar sağlaması,
- Betonun kalıp vasıtasıyla imal edilme özelliğinden kaynaklı olarak tasarımda esneklik sağlayabilmesi gibi birçok faydalı özelliği sayesinde tercih sebebi olmaktadır.

Bu nedenle günümüzde yapı sektöründe başta konut olmak üzere ofis, otel gibi çok katlı veya az katlı birçok yapıda prekast beton cephe panellerinin kullanımı, teknolojinin de gelişimiyle hızla yaygınlaşmaktadır. Prekast betonarme cephe panelleri, kesitlerindeki katmanlaşma biçimine göre farklı yapı malzemelerini içerebilir. Bu katmanlar ve özellikleri ilerleyen safhalarda ayrıntılı olarak ele alınacaktır. (5)

A.Prekast Betonarme Cephe Panellerinin Sınıflandırılması

Prekast betonarme cephe panelleri şu şekilde sınıflandırılabilir:
-Kesitlerindeki katmanlaşma biçimlerine göre,
-Taşıyıcı olup olmamasına göre,
-Üretim sahasına göre,
-Biçim ve ebatlarındaki farklılaşmalara göre farklı çeşitlerde ele alınabilir. (5)

B. Katman Düzenlerine Göre Prekast Betonarme Cephe Panelleri

Betonarme Cephe Panellerini kesitlerindeki katman düzenlerine göre sınıflandırılmak içindeki bileşenlerinin sayısına göre yapılabilir. Böyle bir sınıflandırma için Betonarme Cephe Panelleri üç grupta incelenir: (6);

-Tek Katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri
-Çift katmana sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri
-Çok katmana sahip (sandviç) Betonarme Cephe Panelleri

B.1 Tek Katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri

Bu elemanlar hafif betondan ya da normal betondan üretilebilirler. Hafif beton kullanılarak üretilen türlerinde hedeflenen kalınlığın oluşturulmasının ardından atmosferle arasında ısı bariyeri oluşturarak belli düzeyde yalıtım sağlamaktadır.

Tek Katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri hafif olmaları sebebiyle üretimleri esnasında, depolamaları ve nakliyeleri konularında çok avantaj sağlamaktadır. Ayrıca montaj kolaylığı sağlayabilmesi gibi olumlu özelliklere sahiptir. Fakat kırılmaya karşı mukavametinin düşük olması, atmosfer şartlarına karşı özellikle de suya karşı nispeten zayıf davranması sebebiyle önlemler alınmasını zorunlu kılması gibi özellikleri de bünyesinde barındırmaktadır. Ayrıca ısı yalıtımını arttırmak amacıyla kimi zaman kalınlığının artırılması yoluna gidilmekte bu durum ise fazla ağırlık artışı ve yapıda fazla alan işgal etme gibi sonuçları doğurmaktadır. Hafif betondan imal edilen prekast panellerin başka bir olumsuz özelliği, mukavemetinin düşük olması sebebiyle büyük ebatlarda üretilememesidir. Standart yoğunluk ve ağırlıktaki betondan imal edilen tek katmanlı prekast paneller kırılmaya karşı hafif betondan imal edilenlere göre daha dayanıklıdır. Fakat hafif betondan üretilenler kadar ısı yalıtımı sağlayamamaktadırlar. Bu sebeple yapıya mutlaka içeriden veya dışarıdan ısı yalıtımı uygulamaları yapılması gerekmektedir. Cephenin içerisinden yapılan

yalıtımda, beton yüzey ve yalıtım katmanları arasında sonradan yoğuşma sorunu ortaya çıkabilmektedir. Bu durumla karşılaşdığında buhar kesici uygulaması yapılabilir veya bunlara hiç gerek kalmadan yalıtım ilk etapta komple dış cepheden yapılabilir. Tek katmanlı prekast panellerde anlaşılacağı üzere prekast üretim tarzının avantajları tam olarak istenildiği gibi sağlanamayabilir. Bu nedenle yalıtım sağlaması amacıyla veya mukavemet kazandırmak amacıyla ekstra bir katmana daha ihtiyaç duyulabilmektedir. (5)

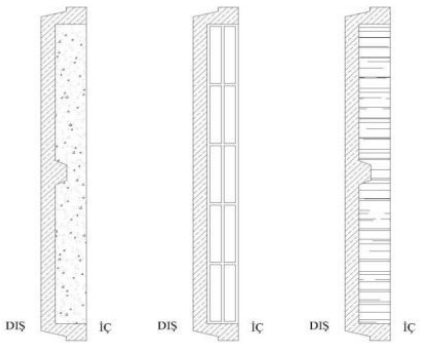
Tek katmanlı prekast cephe panelleri kolonlarla hem yüz şekilde her kolonun üzerine derz boşluğu konulacak şekilde yapının dış kabuğunu oluşturabilir. Derz boşlukları genellikle 2-3 cm bırakılması yeterli olacaktır. Bu derz boşlukları montaj kolaylığı ve genleşme payını sağlar. Fakat özellikle yüksek kaliteli ve yoğunluklu beton kullanıyorsa bu durum ciddi bir ağırlığa neden olacaktır. Dolayısıyla yataydan gelen deprem yükleri için dezavantaj oluşturabileceği ihmal edilmemelidir. Bunun yerine başka şekilde de betonarme kolonlar yiv boşluklu olacak şekilde imal edilerek panellere bu yivlerin içine yerleştirilir. Özellikle zemin emniyet gerilmesi nispeten düşük olan bölgelerde panelleri sağlamlaştırmak amacıyla metal plakalar vasıtasıyla kolonlarla birleştirilebilir.



Şekil 1: Prekast Beton Panellerin Kolonlar Arasına Montajı(Pekintaş Construction) (URL-1)

B.2 Çift Katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri

Tek Katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panellerinin olumsuz özelliklerini bertaraf edebilmek amacıyla katman üzerine başka bir panelin eklenmesiyle imal edilir. Panelin kesitini incelediğimizde çoğunlukla iç katmanın ısı yalıtım özelliği gösteren malzemelerden, dış katmanın ise yapı fiziği sorunlarına karşı direnç göstermesi amacıyla imal edildiğini görürüz. Panelin iç katmanının yalıtım sağlayabilmesi durumunda yoğuşma sorunu söz konusu olmamasına özen gösterilmelidir. Katmanların çok sayıda alternatifleri olduğundan çok farklı şekillerde imal edilebilirler. Çift katmanın oluşabilmesi için beton; mineral yünler, çekme polistren olarak bilinen ekstrude köpük (XPS), genleştirilmiş polistren olarak bilinen (EPS) köpük veya geleneksel bir malzeme olan tuğla gibi yalıtkan malzemeler ile beraber kullanılabilmektedir. Ayrıca hammaddemiz olan betonun çeşitli yoğunluklarda kullanılmasıyla çeşitli çift katmanlı prekast cephe panelleri imal edilebilmektedir. Çift katmanlı ya da çok katmanlı prekast cephe panellerinin geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Çift katmanlı prekast cephe panelleri üzerine Mackechnie ve Saevarsdottir (2007) tarafından Yeni Zelanda'da yapılan araştırmalarda farklı yoğunluklara sahip ve farklı oranlarda prekast betonarme panel alternatifleri geri dönüştürülebilen malzemeler ile imal edilmiştir. Birçok farklı teste tabi tutulan prekast panellerden başarılı şekilde ısı yalıtımı sağlaması ve ısı depolama özelliğini iyi sağlaması beklenmiştir (8).



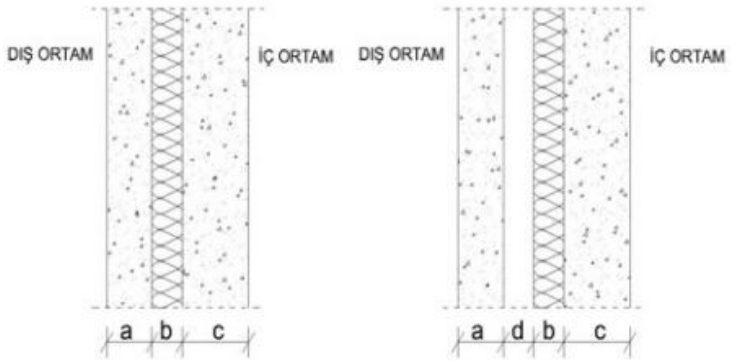
Şekil 2: Çift Katmanlı Prekast Betonarme Cephe Panelleri(5)

Şekil 2'de Çift Katmanlı Prekast Betonarme Cephe Panelleri türlerinin kesitleri verilmiştir. Soldan sağa ilk cephe paneli panel gaz beton ve betonun bir araya getirilmesi suretiyle imal edilir. Soldan sağa ikinci cephe paneli ise beton ve tuğlanın bir araya getirilmesiyle imal edilmektedir. Son sıradaki prekast panel ise beton ve mineral içerikli yünlerin bir araya getirilmesiyle üretilmektedir.

a. Çok katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panelleri

En az üç adet katmanın bir araya getirilmesiyle imal edilen oluşan prekast panellerdir. Büyük çoğunlukla betonarmeden imal edilmiş iki katmanın arasına yeterli ısı yalıtımı sağlayabilecek farklı bir malzemenin yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Yerleştirilen ısı yalıtım katmanı ile beraber yoğuşma riskini minimuma indirmek amacıyla hava boşluğu da oluşturulmakta üretimi bu şekilde gerçekleşmektedir. (9).(10)

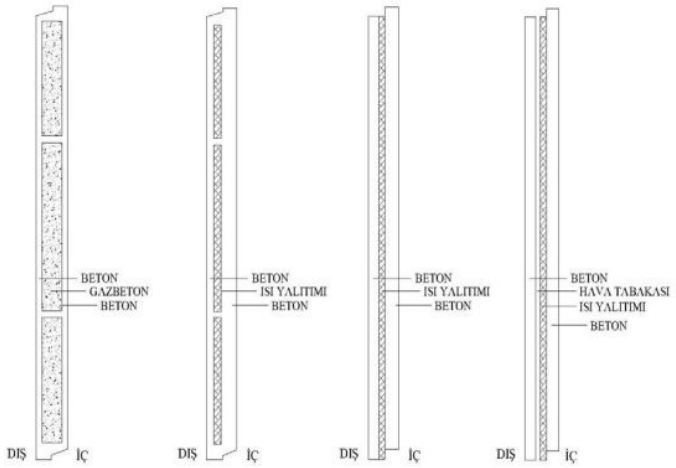
Çok katmana Sahip Prekast Betonarme Cephe Panellerinde çoğunlukla iç katman ısı enerjisini depolar ve taşıyıcılık görevini üstlenir. Dış katmanın ise atmosferden ve kullanıcılardan gelen yapı fiziği etkilerine karşı koruyuculuk görevi bulunmaktadır. İç katman genellikle daha mukavim olduğundan bu katmadan yayılan ısı enerjisi, yalıtım katmanı ve dış katman arasına doğru akışa geçebilir. Yalıtım katmanı ile dış katmanın arasındaki bölgeyi soğuk ara kesit olarak tanımlarsak buraya akan ısı enerjisi yoğuşma meydana getirebilir. Dolayısıyla yalıtım katmanına olu msuz etki oluşturabilir. Bu sebeple yalıtım katmanı olarak bahsettiğimiz orta katmanın içe bakan yüzeyine buhar kesici uygulaması yapılmalıdır. Çok katmana sahip prekast panellerde dıştaki katman ile ortadaki yalıtım katmanının arasında belli ölçüde hava boşluğu oluşmasına izin verilerek, açığa çıkan buharın yoğuşma gerçekleşmeden dışarıya atımı sağlanabilir. Çok katmana sahip prekast betonarme cephe panellerinde dıştaki katmanın kalınlığının 7 cm ila 10 cm arasında olması önerilmektedir. Yalıtım katmanı olarak nitelendirdiğimiz ortadaki katmanın ise 4 cm ila 10 cm arasında, iç mekana bakan katmanın kalınlığının 8 cm ila 16 cm, hava boşluğu olarak bırakılacak katmanının ise 3 cm ila 6 cm arasında belirlenmesi önerilmektedir. (6) (11) (12)



Şekil 3: Çok katmanlı prekast betonarme cephe panellerinin kesitleri(5)

Şekil 3'de iç katman "c" ile, yalıtım katmanı "b" ile, dış katman "a" ile ve son olarak hava boşluğu "d" ile gösterilmiştir.

Çok katmanlı prekast cephe panellerinde betonarme olarak imal edilen iki katmanın arasına ısı yalıtım katmanı olması için, polimer ısı yalıtım malzemelerinden çekme polistren olarak bilinen ekstrude köpük (XPS), genleştirilmiş polistren olarak bilinen (EPS) köpük konulabilir. Bu malzemelerin yanı sıra mineral yünler (cam veya taş yünü) de tercih edilebileceği gibi hafif beton türlerinden de tercih edilebilmektedir. Aslında bu sayede beton malzemeden bir tür prekast sandviç panel üretimi gerçekleşmiş olur. Şekil 9'da bu tip panelin türlerinin kesit çizimleri verilmiştir. (13)



Şekil 4: Tek parça şeklinde fabrikada üretilebilen sandviç panel formuna getirilmiş çok katmanlı prekast beton cephe panellerinden örnekler(5)

3.1.1. Taşıyıcılık Niteliklerine Göre Prekast Betonarme Cephe Panelleri

Prekast Betonarme Cephe Panelleri taşıyıcılık niteliklerine göre üç sınıfta incelenirler (13) ;

-Yapının taşıyıcı sistemi aracılığıyla taşınan prekast betonarme cephe panelleri

-Sadece kendi yükünü taşıyan prekast betonarme cephe panelleri

- Yapıda taşıyıcı niteliğe sahip prekast betonarme cephe panelleri

a. Yapının taşıyıcı sistemi aracılığıyla taşınan prekast betonarme cephe panelleri

Bu panellerin ağırlıkları çoğunlukla 50-200 kg/m2 arasında değişir. Tabii olarak bu panellerin zati yükünü yapının kendi taşıyıcı sisteminde ve olan perdeler, kolonlar veya kirişler taşımaktadır. (14) (15).
Asıl amaç ısı veya ses yalıtımı elde etmek ise bu hedefle üretilen hafif prekast cephe panelleri statik açıdan taşıyıcı değildir. Prekast betonarme Cephe panellerinin üstlendiği bu farklı görevlerin gereksinimlerini tasarım aşamasında kavrayıp ona göre planlama yapmak oldukça önemlidir. Nitekim taşıyıcılık özelliği olan ve ağırlığı bu özelliğe göre etkilenen prekast cephe panellerinin uygulama yapılacak yapıdaki statik hesaplarını etkileyebilir. Prekast cephe betonarme cephe panellerinin taşınan yapı elemanları olarak üretilmesi durumunda, yapıdaki statik hesaplarda çok ciddi ağırlıklara sahip olabileceğini görmekteyiz. (5)

b. Sadece kendi yükünü taşıyan prekast betonarme cephe panelleri

Bu paneller yatay düzende montajlandığından dolayı kendi yüklerini birbirlerinin üzerlerine aktarırlar. Yataydan gelen zati yükler, farklı ankraj elemanları vasıtasıyla bağlandıkları döşemeye iletilir. (15) Ülkemiz gibi deprem kuşağında yer alan ülkelerde Bu prekast cephe panellerinin yatay derzlerinde taşıyıcı sistemin oynaması veya hareketi sonucunda sorun oluşabilmesi riski oldukça yüksektir. Bu nedenle bahsettiğimiz sistem, sallantı hareketlerinde zayıf kalabileceği için tavsiye edilmeyen bir çözüm türüdür.

c. Yapıda taşıyıcı niteliğe sahip prekast betonarme cephe panelleri

Bu tür paneller kendi zati yükleri ile beraber binanın geri kalan yüklerini de taşırmaktadırlar. (13) Taşıyıcı niteliğe sahip prekast betonarme cephe panellerinin, diğer türdeki prekast betonarme panellere göre kesitleri ve içindeki donatı daha fazladır. Dolayısıyla ağırlığı da daha fazladır bu durum ise montaj, depolama, taşıma ve üretim aşamalarında birçok problemi doğurmaktadır.

Ağırlıklarının fazla olması ve taşıyıcılık görevi üstlenmeleri sebebiyle deformasyona uğrayabilen bu tür cephe panellerinde en önemli noktalardan biri birleşim derzleridir. Taşıyıcı niteliğe sahip betonarme cephe panelleri ağırlıkları sebebiyle yapıya fazlada yük getirir. Fakat kendileri de yük taşıma özelliğine sahip olduklarından perde ve/veya kolon gibi yapının strüktürel elemanlarının kesitlerinin küçültülmesiyle, yapı strüktür elemanlarının daha az yer işgal etmesi sağlanabilir. (5)

IV. SANDVİÇ PANELLER

Sandviç paneller, yalıtkan ve çoğunlukla düşük dayanıma sahip iç dolgunun iki dirençli yüzeyin arasına yerleştirilmesiyle imal edilen yapı malzemeleridir. (16). Esasen sandviç paneller, prefabrike yani ön üretimli yapı malzemelerinden sayılmaktadır. Bu nedenle endüstrileşmiş bir yapı malzemesidir. Sandviç panel olarak adlandırılan ilk malzemeler uzay ve savaş teknolojileri sektörlerinde 1940'lı yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Yıllar geçtikçe teknolojiyle beraber yeni malzemelere olan talebin artması, hafif ve yalıtkan malzemelere olan talebin artması nedeniyle sabdviç panele duyulan rağbet de artmaktadır. (17).

4.1. Sandviç Panellerin Bileşenleri

Birden çok tabakaya sahip kompozit malzemelerde, kompoze uygulamasının amacı malzeme tabakalarının pozitif özellikleri bir arada toplayabilmektir. Bu sayede tabakaların negatif özellikleri bertaraf edilmiş olur. (16). Bu tanımları incelediğimizde doğal olarak sandviç panellerin 'birden çok tabakalı kompozit malzeme' sınıfında yer aldığını söyleyebiliriz. Sandviç panellerdeki kompozisyona baktığımızda genelde orta katmanda kullanılan dolgu malzemelerinin yalıtımı özelliği ve dış yüzey malzemesinin yük taşıma özelliğinin birleştirildiğini görmekteyiz.

4.2. Sandviç Panellerin Olumlu ve Olumsuz Yönleri

Sandviç panellerin diğer malzemelere gore öne çıkan avantajları şöyle sıralanabilir; (16)

-Hafif olmalarına karşın, yük taşıma kapasiteleri yüksektir.

-Panel gövdesi çoğunlukla yalıtkan malzemelerden üretilir.

-Orta katmanında mineral yün dolgusu olan panellerin yangın dayanımı yüksektir.

-Panel üretim prosesinde kalite konrole önem verilmektedir.

-Montajı, birçok malzemeye gore oldukça hızlı yapılabilir.

-Uzun ömürlüdür ve bakım-onarım maliyeti oldukça düşüktür.

Sandviç panellerin çok sayıda olumlu özelliği varsa da dış yüzey ve dolgu malzemelerinin bünyesinde olan olumsuzluklar da doğal olarak görülmektedir. Bunlar (16)

-Dış yüzeylerin ısı iletkenliğinin fazla olması sebebiyle deformasyona meyyal olması,

-Polimer esaslı olan köpük dolgulu sandviç panellerin güneş ışınımı etkisinde sıcaklık farkından dolayı sünmesi,

-Panellerin biribiryle veya diğer yapı elemanlarıyla bağlantılarının iyi tasarlanmadığı durumlarda oluşan durumlarda yapıda yalıtım sorunları oluşması olarak sıralanabilir (16).

Sandviç paneller büyük çoğunlukla üç katmandan oluşmaktadır. Bu üç katman Panelin atmosfere bakan dış yüzeyi, orta katman ve iç mekana bakan yüzeydir. Atmosfere bakan dış yüzey istenen renklerde ve tasarımı yapılmış farklı şekillerde üretilebilir. Orta katman ise, panellerin rijitliğini sağlamada önemli pay sahibidir. Ayrıca panelin kalınlığını ve yalıtımsal parameterlerini belirler. (18). Sandviç panellerin dış yüzeyi genelde alüminyum sac, paslanmaz çelik sac, ahşap kökenli levhalar, alçı plaklar veya galvaniz saclardan yapılabilir. (16). Sandviç panellerin orta katmanı ise günümüzde yaygın olarak polietilen köpük, polistren köpük, poliüretan köpük, kağıt esaslı veya metal esaslı petek dolgular, bitümlü mantar gibi oldukça hafif ve statik açıdan eğilme direnci kayda değer anlamda yüksek sayılabilecek malzemelerden imal edilmektedir. (18).

4.3. Sandviç Panellerin Kullanıldıkları Yere Göre Sınıflandırılması

Sandviç panellerin endüstriyel yapılarda yaygın olarak yatay ve düşey yüzeylerin kaplanması iç mekan hacimlerinin böünmesi amaçlarıyla kullanılırlar. Endüstriyel yapılarda çatı ve cephe kaplamaları iç mekan bölme uygulamaları çeşitlilik göstermektedir (19). Sandviç paneller, endüstriyel yapılardaki kullanım alanlarına göre sınıflandırılsa; çatı paneli, duvar paneli (cephe paneli), ve soğuk oda kabuğu oluşturması için soğuk oda panneleri olmak üzere temelde üç farklı seçenek karşımıza çıkar 16).

4.3.1. Çatı Panelleri

Günümüzde çatı panellerinin büyük kısmı güçlü bir dış yüzeye sahiptir. Bunun en önemli nedeni, panellerin çatıda kendi yükü dışında statik olarak kar yükünü de taşımasıdır. Ayrıca çatı panellerinin üzerinde rahatlıkla yürünebilmelidir. (16).



Şekil 5: Endüstriyel Yapıda Çatı Paneli Uygulaması

4.3.2. Cephe Panelleri

Cephe panellerinde tercih edilen yüzeylerin et kalınlığı genellikle çok azdır. Günümüzde yaygın olarak galvaniz sac yüzeyler ve aluminyum sac yüzeyler kullanılmaktadır. Ülkemizde yüzey saclarının kalınlığı genelde 0,30 mm ila 1 mm arasında değişmektedir. Yüzeylerin ince tercih edilmesi üretim esnasında şekil vermeyi kolaylaştırmaktadır. Hafif olması ndeniyle de montajın kolaylığı sağlar. Panel kalınlıkları ülkemizde 40 mm ila 200 mm araasında yaygın olarak üretilmektedir. Panelin atmosfere bakan dış sacı 1mm ile 4mm arasında farklı desenlerde şekillendirilir. Bu şekillendirme uygulaması; (16)

-Panelin saclarının mukavetinin artırılarak panelin kendisinin mukavetinin artırılması,

-Estetik bir yüzey görünümünün elde edilebilmesi amaçlarıyla yapılmaktadır.



Şekil 6: Endüstriyel Yapıda Cephe Paneli Uygulama Süreci

4.3.3. Soğuk Oda Panelleri

Soğuk odalar olarak belirttiğimiz mekanlar çoğunlukla gıda depolarıdır. Gıda ürünlerinin bozulmaması için yalıtım çok önemli yer tutmaktadır. Her türlü yalıtım zaafiyeti ciddi enerji, dolayısıyla maliyet kaybına neden olmaktadır. Bunu sağlamak amacıyla panelin dolgu malzemesinin türü ve panel kalınlığı uygun tercih edilmelidir. Ayrıca soğuk odalarda bağlantı elemanlarının tasarımı ve montajı önem arz etmektedir. Bağlantı elemanları, öyle tasarlanmalı ve monte edilmelidir ki sonrasında enerji kaybına neden olmamalıdır. Bu nedenle günümüzde artık birçok Avrupa ülkesinde soğuk mekanlar için özel paneller ve özel bağlantı elemanları üretilmektedir. Montaj esnasında panellerin birleştiği kenarlara boydan boya mastik veya benzeri malzemeler sıkılarak birleştirililebilir. Montaj sonrasında da kenarlara bu uygulama yapılabilir. Bu maliyetli bir uygulmadır fakat yapılması gereklidir. (16).

4.4. Sandviç Panellerden Beklenen Özellikler

Sandviç paneller; üretim sürecinde, nakliye ve montaj esnasında meydana gelebilecek basınç kuvvetlerine karşı dayanıklı olmalıdırlar. Dış yüzeyler ısısal olarak iletken orta katman ise yalıtkan olduğundan güneş ışınımına maruz kaldığında genleşme ve büzüşmeye karşı dayanıklı olmalıdırlar. Ayrıva her malzemeden beklendiği gibi yangına dayanıklılık da burada önem arz etmektedir. Sandviç panellerden beklenen bir diğer özellik de dış katmanların iç dolgu malzemesiyle beraberliğinin güçlü olmasıdır. Atmosfere bakan renkli kısmın renginin uzun süre korunabilmesi, panelin kendisinin ve birleşim bölgelerindeki bağlantı elemanlarının korozyona karşı dayanıklılık sağlaması beklenmektedir. Ayrıca atmosferden gelen koşullara karşı mukavemetli olması gibi özellikler de panellerden beklenmektedir. (16) Saydığımız bu özellikler bir tarafa, sandviç panellerden esasen beklenen temel özellikler; taşıyıcılık özellikleri, ısıl direnç davranış, su geçirimsizlik ve hava geçirimsizlik sağlamasıdır.

4.4.1. Taşıyıcılık ile ilgili özellikler

Sandviç panellerin taşıyıcılık özelliği dış yüzey ve dolgu malzemelerinin doğru tercih edilmesine, doğru koşullarda üretilmesine ve tasarımları gibi etmenlere bağlıdır. Sandviç paneller, dayanıklılığını, yalıtkanlık özelliklerini ve yüzey görüntülerini belirlenen ömürleri boyunca korumalıdırlar. Rüzgâr yükleri, kar yükleri ve ölü yükler gibi yükleri taşımalıdırlar. Kar gibi uzun süre boyunca etkiyen yükler yorulmalarıa neden olmaktadır. (16).

4.4.2. Isı ile ilgili özellikler

Günümüzde iç mekanda ısıl konfor ihtiyacı nedeniyle dünya genelinde enerji ihtiyacı artmıştır. Sandviç panellerdeki dolgu malzemelerinin yalıtkan olması endüstriyel yapılarda panel kullanımının avantajlarından biridir. Birleşim bölgeleri ve bağlantı malzemeleri hem iyi tasarlanmış hem de iyi montajlanmış sandviç panellerin ısı yalıtımı ve hava geçirimsizlik özellikleri oldukça yüksektir. (16). Isı köprüleri çoğunlukla, ısı yalıtkanlığı iyi olan bir yapı malzemesinin, daha kötü denilebilecek bir yapı malzemesi ile beraber olduğu detay bölgelerinde artar. Isı köprüleriyapıda, ısıl enerji kayıplarına, yoğuşmaya ve yüzeylerde kirlenmeye sebep olur. Birleşim detayları hem iyi tasarlanmış hem de iyi montajlanmış sandviç panel uygulamalarında ısı köprüleri daha az olacaktır. Fakat kimi zaman sandviç panellerde ısı köprüleri oluşabilmektedir. Genellikle pencere ve kapı boşluklarının detay noktaları iyi yapılmamışsa, panel bağlantı elemanlarında kullanılan vidaların hava ile teması fazla ise sandviç panellerde ısı köprüleri oluşabilmektedir. (16).

4.4.3. Su geçirimsizlik ile ilgili özellikler

Binalarda su yalıtımı, yapı fiziği açısından çok fazla önem teşkil etmektedir. Yapının dış duvarlarındaki veya çatısındaki su, yapının sahip olduğu ısı yalıtımı özelliklerini ve mukavemetini pek tabii azaltabilir. Sandviç panellerin yapısında gövde itibariyle yekpare bir oluşum söz konusu olsa da, buradaki asıl önemli kısım bağlantı detaylarındaki çözümlemelerdir. Şiddeti fazla olan ve sepkenli yağmurlarda dış yüzeyde, hava geçişini olumsuz etkileyecek su tabakaları oluşabilmektedir. Eğer, böyle yağışlarda rüzgar şiddeti artar ve buradan hareketle basınç farkı artarsa, su yapı içerisine girebilir. Ayrıca, detay bağlantılarının yapılarına göre, kapı ve pencere bölgelerinde su girişi oluşabilmektedir. Bu nedenle, sandviç panel uygulamalarında cephe ve çatılardaki detaylar oldukça önemlidir. (16).

4.4.4. Nem ile ilgili özellikler

Sıcaklık değişimleri kaynaklı oluşabilecek nem, panel yüzeylerinde kirlenmeye neden olur. Nem, esasen bağlantı elemanları için önemli bir tehdittir. Bağlantı elemanlarında oluşabilecek korozyon panelin mukavemetine, dolayısıyla taşıyıcılığına olumsuz etkiyecektir. (16). Yapı yüzeyinde nem geçişlerinin ve depolanmasının engellenmesi için farklı yollar izlenebilir. Yapı tasarımının izin verdiği ölçüde nemin doğrudan tahliyesi sağlanabilir veya bu yapılamıyorsa buhar kesiciler uygun bölgelere konulabilir. (20).

4.4.5. Hava geçirimsizlik ile ilgili özellikler

Dünya genelinde yapılarda enerji tüketimi oldukça fazladır. Bu tüketimi, kontrol edilmeyen hava sızıntıları önmeli ölçüde etkilemektedir. Sandviç paneller, zaten hava geçirimsiz malzemelerdir. Burada dikkat edilmesi gereken sandviç panellerin birleşim noktalarıdır. Üretim ve montaj esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanabilir:

-Zemine veya perdeye oturan cephe panellerinde betonla birleşim bölgesine dikkat edilmelidir.

-Saçak detaylarındaki birleşim noktaları özenle tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.

-Kapı ve pencerelerin geleceği yerlere montaj yapılırken ihtimam gösterilmelidir.

-Şantiyedeki bütün montaj süreci iyi takip edilmelidir. Bu parametrelere dikkat edilirise geçirimsizlik elde edilebilir. (16).

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ülkemizde endüstriyel yapıların inşa sürecinde modern tekniklerin ve malzemelerin kullanıldığını rahatlıkla görebiliriz. Esasen modern üretim tekniklerinden prefabrikasyonun bize sunmuş olduğu betonarme panelleri ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan sandviç panelleri incelemiş bulunmaktayız. Endüstriyel yapıların hızla yaygınlaştığı 1980'li yıllardan itibaren beton panel üretimi de yaygınlaşmış ve gelişmiştir. Günümüze kadar olan süreçte beton paneller farklı malzemelerle de biraraya getirilerek kompoze malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Yapının kendi karkasına uyumlu olarak üretilebilen beton paneller yıllar içerisinde ağırlığı, maliyeti ve bir defada betonu döküldüğü için ölçülerinde revize yapılamaması nedeniyle dezavantajlar oluşturmaya başlamıştır.

Bu minvalde özellikle 1990'lı yıllarda Avrupa'da yaygınlaşan sandviç panel malzemesi takip eden yıllarda ülkemizde de üretilmeye başlanmıştır. Hafifliği, yalıtkanlığı, maliyetinin nispeten uygun olması, montajının kolay olması, projelerde tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden olmuştur. Halen gelişmekte olan sandviç panel teknolojisi yapılarda estetik görünüm de sağlamaktadır.

REFERENCES

1. Hasol, Doğan. (2010). Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü. s. 161 İstanbul: YEM Yayınları.
2. Köksal, Gül. T. (2012). Endüstri mirasını koruma ve yeniden kullanım yaklaşımı. Güney Mimarlık Dergisi, 8, 18-23.
3. Yenal, Oktay. (1999). Ulusların zenginliği ve uygarlığı-eğitim boyutu. Ankara: İş Bankası Kültür Yayınları
4. Eryiğit, Zeliha Büşra ve Anıktar, Serhat. (2021) "Yeniden İşlevlendirilmiş Endüstri Yapılarında Mekân Algısı" İdealkent, Sayı 32, Cilt 12, Yıl 2021-1 syf: 713-714
5. Altınay, Gamze. (2011). "Beton Esaslı Prekast Cephe Panellerinin Üretimi, Uygulaması, Yapısal Performansının Değerlendirilmesi Ve Bir Alan Araştırması İle İncelenmesi", İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, s.5-20,

6. Herzog, Thomas., Krippner,Roland., Lang,Werner., (2004). Façade Construction Manual, Birkhaeuser, Munich.
7. URL-1: https://www.pekintas.com.tr/cephe-paneli.aspx
8. Mackechnie, James. R., Saevarsdottir, Thorbjorg., (2007). New insulating precast concrete panels, SBO7 NZ, 065,1-11, Auckland, New Zealand
9. EN 14992, (2007). Precast concrete products - Wall elements, Brussels.
10. PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, (1997). State of the Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels, Precast, Prestressed Concrete Institute, Chicago.
11. Zorer Gedik, Gülay., (2001). Hazır Dış Duvar Elemanlarının Isısal Konfor Açısından İncelenmesi Ve Değerlendirilmesi, Makina Mühendisleri Odası Yalıtım Kongresi, Eskişehir.
12. Barkauskas, K., Friedbrt., Kauhseti, Bruno., Polonyi, Stefan., Brandt, Jörg., (2002). Concrete Construction Manual, Birkhaeuser, Basel, Switzerland.
13. Ayaydın, Yükselen. , (1987). Taşıyıcı Duvar Perdeli Prefabrike Yapılar, M.S.Ü., İstanbul.
14. Ayaydın, Yükselen. (2004). 12 Soruda Beton Prefabrikasyon, İstanbul.
15. Barka, A. Günkut, (2003). Mimari Prekast Beton, Beton Prefabrikasyon Dergisi, 67.
16. Davies J. Michael, (2001) Lightweight Sandwich Construction: Blackwell Science, Londra.
17. Vinson, Jack. R. (2005) Sandwich Structures: Past, Present, and Future: Springer, Netherlands.
18. Toydemir, Nihat., Gürdal. Erol., Tanaçan, Leyla. (2000) Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme, Literatür Yayınları, İstanbul
19. Ersoy, Halit. Yaşa., (2001) Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, İstanbul
20. Oral, Gül., Altun, Cem., Manioğlu, Gülten., (2005) Binalarda Isı Yalıtımı ve Nem Kontrolü- TMMOB Makina mühendisleri odası-Yalıtım, Ezgi Matbaacılık, İstanbul

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Elektrikli Kargo Bisiklet Tasarımı

Meryem Berfin ŞAHİN[a], Ümit YAVUZARSLAN[a], Semih ÇETİNKAYA[a], Yusuf ALTUN[b],*

[a]Volta Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tasarım Merkezi, Cumayeri Fabrika, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** tm_tasarimci1@volta.com.tr*

ÖZET

Bu makalede Volta VB7 elektrikli kargo bisikletinin tasarım ve işlevselliği üzerine odaklanılmıştır. Volta VB7 Kargo bisikletleri, Avrupa pazarında artan talep doğrultusunda elektrikli kargo bisikletlerine yönelik bir ihtiyacın belirlenmesi üzerine geliştirilmiştir. Bu makalede ele alınacak olan elektrikli kargo bisikletinin kullanımı, maliyetlerin azalmasına katkı sağlarken, sürücülerde ehliyet gerektirmemesi, daha fazla kurye personelinin istihdamını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu durum kadın kurye sayısını artırarak toplumsal cinsiyet eşitliğine de katkı sağlayacaktır. Çevre dostu ve hızlı teslimatlar, şehir içi trafik sıkışıklığına çözüm sunmaktadır. Bu bisikletin kullanımı işletmeye maliyet konusunda etkin çözüm sunarken, sürdürülebilir ulaşımı ve yerel ekonomiyi destekler. VB7 Elektrikli kargo bisiklet modelinin öncelikli hedefi, rakiplerine göre daha iyi bir performans sergilemek üzere menzil, dayanıklılık ve ergonomi açısından iyileştirilmiş bir yapı sunmaktır. Bu model, rakiplerinden daha uzun bir menzile sahip olmasıyla dikkat çekerken, kullanım sırasında denge problemlerini minimize etmek için sağlam bir gövdeye sahiptir. Ayrıca, kullanıcı konforunu artırmak amacıyla ayarlanabilir bir gidonla donatılmıştır. Elektrikli bisiklet kullanımında işlevsellik, konfor ve iyi tasarım gibi özellikler kullanıcıları elektrikli araç kullanmaya teşvik edecektir.

Anahtar Kelimeler: *Elektrikli bisiklet, Tasarım, Kurye aracı.*

Design of Electric Cargo Bike

Meryem Berfin ŞAHİN[a], Ümit YAVUZARSLAN[a], Semih ÇETİNKAYA[a], Yusuf ALTUN[b],*

[a]Volta Motor Industry and Trade Inc. Design Center, Cumayeri Factory, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
***Corresponding Author:** tm_tasarimci1@gmail.com*

ABSTRACT

This article focuses on the design and functionality of the Volta VB7 electric cargo bike. Volta VB7 Cargo bikes were developed based on the identification of a need for electric cargo bikes in line with the increasing demand in the European market. The use of electric cargo bikes, which will be discussed in this article, contributes to reducing costs, while the fact that drivers do not require a driver's license facilitates the employment of more courier personnel. It will also contribute to gender equality by increasing the number of female couriers. Environmentally friendly and fast deliveries offer a solution to urban traffic congestion. The use of this bicycle provides a cost-effective solution for the business, while supporting sustainable transportation and the local economy. The primary goal of the VB7 Electric cargo bike model is to offer an improved structure in terms of range, durability, and ergonomics to outperform its competitors. This model is notable for having a longer range than its competitors, while it has a robust frame to minimize balance problems during use. It is also equipped with an adjustable handlebar to improve user comfort. Features such as functionality, comfort and good design in the use of electric bicycles will encourage users to use electric vehicles.

Keywords: *Electric bicycle, Design, Courier vehicle.*

I. GİRİŞ

Bisiklet kullanımına katılımın artması ekonomik ve çevresel açıdan faydalıdır ve önemli bir potansiyele sahiptir [1]. Avrupa pazarının dinamik yapısında rekabet avantajı sağlamak üzere geliştirilen VB7 Kargo bisikletleri, elektrikli taşımacılığın önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Bu bisikletler, özellikle şehir içi teslimat hizmetlerinde maliyetleri optimize ederken çevre dostu ve hızlı teslimatlar sağlayarak trafiği azaltma potansiyeline sahiptir. İçten yanmalı motorların verimi genellikle %25 ile %38 arasında değişir. Elektrikli araçlar ise genellikle %71 ile %89 arasında yüksek bir verimlilik gösterir. [2]. Ulaştırma sektöründeki firmalar, lojistik operasyonlarında sürdürülebilirliği izlemek zorundadır çünkü bu, sadece mali ve diğer faydaları sağlamaz, aynı zamanda doğru bir tutum sergilemelerini sağlar. Avrupa'da elektrikli bisikletlerin giderek daha fazla tercih edilmesi, şehirlerde sürdürülebilir ulaşım çabalarının bir parçası olarak çevre dostu ve ekonomik bir ulaşım seçeneği olarak görülmeleriyle yakından ilgilidir. Elektrikli araçlar, taşıma ve kargo sektöründe uygulanabilir bir çözüm olarak görülmektedir. Bu nedenlerle, taşıma yöneticilerinin elektrikli araçların avantajları konusunda ikna edilmesi önemlidir. [3]. Bisiklet altyapısı inşa edilirken, ön bilgilere aşırı güvenmek bazı kuryelerin ihtiyaçlarını karşılarken diğerlerinin ihtiyaçlarını göz ardı edebilir. Bu da altyapının her kurye için uygun olmadığı anlamına gelir. İşte bu noktada tasarım, ergonomik ve kişiselleştirilebilir iyileştirmeler çok önemlidir. Konumlarına bağlı olarak, kargo bisikleti üzerindeki bileşenler özelleştirilebilir veya ergonomik çalışma koşullarını destekleyecek şekilde tasarlanabilir. Genel olarak, kargo bisikletleri duygusal, sembolik ve çevresel açılardan avantajlı bulunurken aynı zamanda esneklik ve fiyat açısından da öne çıkar. Ancak, trafik güvenliği, seyahat hızı, konfor ve hava koşullarından bağımsızlık gibi diğer pratik yönlerde otomobillerle farklılıklar mevcuttur.[3],[4]. Tasarlanan VB7 kargo bisikleti, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve kullanımını daha ergonomik hale getirmek için çeşitli özelliklere sahiptir. Bu özellikler, kuryelerin günlük işlerini daha verimli bir şekilde yapmalarını sağlamak için özel olarak tasarlanmıştır. Örneğin, kargo bisikletinin tutamakları özel bir yapıya sahiptir. Kauçuk çıkıntılara sahip olan tutamaklar, darbe veya çarpma durumunda kuryelerin ellerini korumakta ve böylece iş güvenliği standartlarına uyumu artırmaktadır. Ayrıca bisikletin gidonunda bulunan geri vites aynası, kuryelerin arkalarında neler olup bittiğini daha kolay görmelerini sağlayarak güvenliği ve kullanım kolaylığını artırmaktadır. Kullanıcı deneyimini daha da geliştirmek için bisikletin tasarımında sabit telefon tutucu ve USB şarj desteği gibi özellikler de yer almaktadır. Bu şekilde tasarlanan bir kargo bisikleti, kurye kullanıcılarının iş verimliliğini artırırken aynı zamanda iş güvenliği standartlarını da karşılayarak işletmeye hem ekonomik hem de pratik faydalar sağlamaktadır. Topluma katkı sağlamak amacıyla tasarlanan kargo bisikleti aynı zamanda kuryelerin elektrikli bisikletleriyle iletişim kurmalarını sağlayarak işlerini daha verimli yapmalarına olanak tanır. Ayrıca bisikletin sürücülere ehliyet gerektirmemesi daha fazla kurye personelinin istihdam edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sayede kadın kurye sayısını artırarak toplumsal cinsiyet eşitliğine de katkı sağlayacaktır. Elektrikli kargo bisikleti modelinin öncelikli hedefi menzil, dayanıklılık ve ergonomi açısından geliştirilmiş bir yapı sunarak rakiplerini geride bırakmaktır. Bu model, rakiplerinden daha uzun menzile sahip olmasıyla dikkat çekerken, kullanım sırasında denge sorunlarını en aza indirmek için sağlam bir şasiye sahiptir. Rakip firmalarda menzil genel olarak 25 Km ortalamasında iken VB7 elektrikli kargo bisikletinde bu 80-100 Km menzildir. VB7 elektrikli kargo bisikletinin 250W motor gücü ve 48V 18,5A bataryası vardır. Bataryada lityum iyon piller kullanılmıştır. Bu batarya kapasitesi bize daha uzun menzili sağlamıştır.

Çağımızın çevre sorunları ve içten yanmalı motorlara bağlı sorunlar, elektrikli araç teknolojisinin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. Hibrit sistemlerle başlayan çalışmalar, sonunda tamamen elektrikle çalışan araçların geliştirilmesine olanak sağladı. Batarya teknolojisindeki ilerlemeler, elektrikli araçların menzilini artırdı ve fiyatlarını daha erişilebilir hale getirdi. Bu nedenle, elektrikli araçlar, çevre dostu bir alternatif olarak daha fazla kabul görmeye başladı [5]. Elektrikli araç sistemleri, fosil yakıt kullanmadıkları ve içten yanmalı motorlara ihtiyaç duymadıkları için ekonomik ve çevreci bir alternatif sunmaktadırlar. Ancak, içten yanmalı motorlu araçlarla rekabet edebilmek için elektrikli araçların maliyetleri düşürülmeli ve tam şarj menzilleri artırılmalıdır [5]-[6]. Li-ion pil içerisinde daha avantajlı olan lityumu bulundurması ve geri dönüştürülebilen bir madde olması nedeniyle enerjisel verimlilik ve toplumsal kazanım açısından önemli olan bir maddedir. Bu madde, sadece sürdürülebilirlik açısından önemli olan değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da geri dönüşüme katkısı sayesinde önemli bir değerdir. Elektrikli araçlarda da bulunan bu kaynak piller, Fosil yakıt kaynaklı araçların sebep olduğu hava kirliliğini azaltmada önemli bir rol oynayan belirgin bir teknolojik ilerlemedir. [7]

Devamında Kargo bisikleti kullanıcı konforunu artırmak için ayarlanabilir bir gidon ile donatılmıştır. Otomotiv sektöründe çalışan büyük bir kısım, hareket kısıtlılığı, ağrı, kas ve hatta iskelet sistemi problemleri yaşayabilmektedir. Bu sağlık sorunlarına bağlı olarak doktordan alınan rapor sayı oranı oldukça yüksektir. Mesleğe bağlı hastalıklar oluşurken; operasyon sırasında yapılan yanlış hareketler, iş sırasında şlçinin vücudunu aşırı zorlanması, kişinin özgün beden yapısına uygun olmayan ortamda olması ve ergonomik yetersizlikler etkilidir. [8]. Çalışma saatlerinin uzunluğu, tekrarlanan hareketler ve ağır yüklerin taşınması, kuryelerin sağlığı ve güvenliği açısından ergonomik riskler oluşturan faktörlerdir. Ayarlanabilir gidon kullanımı kişiye özel alan tanımlanmasını sağlayarak olumlu etkisi olacaktır. Sonuç olarak, bahsedilenler gibi ergonomik iyileştirmelerin iş sağlığı ve güvenliği üzerinde olumlu bir etkisi olması beklenmektedir. İşlevsellik, konfor ve iyi tasarım gibi

özellikler kullanıcıları elektrikli bisiklet kullanmaya teşvik edecektir ve bu durum en nihayetinde karbon emisyonunu azaltarak toplumsal katkı sağlayacaktır.

Elektrikli kargo bisikletinin lastiklerine de özel olarak çalışılmış olup bu lastik ile aracın uzun süre dayanımı soğuk ve buzlu yol şartlarında daha iyi sürüş sağlaması gibi şartlar hedeflenmiştir. Ayrıca karanlık ortamlarda lastik üzerinde bulunan reflektif şerit sayesinde görünür olması sağlanmıştır. Lastiğin hamurunda da özel olarak çalışılmış ve mevsimlere uygun olması sağlanmıştır. Bisikletin çanta demirine özel olarak çalışılmış ve kullanım kolaylığı sağlaması hedeflenmiştir. Bu çalışma sonrasında çanta demiri kızaklı olarak tasarlanmış olup kızaklı olması sayesinde çanta konumu kolayca ayarlanabilir ve bu sayede bisikletin ağırlık merkezini ayarlayabilmek mümkün olmuştur. Ağırlık merkezi yük taşıyacak olan kargo bisikleti için önemlidir. Ayrıca rakiplerinde bulunmayan ön frende hidrolik, arkada mekanik fren sistemi kullanılmıştır. Kargo Bisikleti için bisiklet ayağı da diğer komponentler gibi özel olarak tasarlanmıştır. Genellikle bisikletlerde yan ayak kullanımı uygulanmaktadır. Bu bisikletin dayanımını düşürür ve özellikle kurye uygulamalarında ayak kırılması gibi sorunlar yaşandığı saptanmıştır. VB7 ayak tasarımına özel olarak çalışılmış ve dayanımı güçlü olacak şekilde bir 'orta ayak' çalışması yapılmıştır. Bu ayakla beraber bisiklette dayanım arttırılma sağlanmış ve bisiklet orta ayağı kırılma oranı düşürülmüştür. Araç kullanımı kuryeler için olacağından ve dayanım bu noktada önemli bir yapı taşı olduğundan dolayı taşımada daha dayanıklı olabilmesi için şasi, daha dayanıklı olan st-37 çelik borudan üretilmiştir. Alüminyumun daha yumuşak bir malzeme olması çelik boru seçiminde etkili olmuştur. Bisiklet arka tekerinde sabit arka teker kilidi kullanılarak kullanıcı deneyiminin artırılması amaçlanmıştır. Bu kilit sayesinde kurye hemen aracı kilitleyerek güvenliğini sağlayabilmektedir. Bisiklet koltuğu katlanarak batarya çıkarılabilmektedir. İstenilen yere götürülüp şarj edilebilir veya yenisi ile değiştirilerek sürüşe devam edilebilmektedir. Batarya tükendiğinde ise pedal ile devam edilebilmektedir. Üründe kullanılan balanca yayı, kuryeler için daha dengeli sürüş sağlanması amaçlanmıştır. Kurye elini bıraktığında veya benzeri durumlarda bisikletin dengede kalmasını sağlar. Çift katlı alüminyum jant kullanılarak kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir. VB7 Elektrikli kargo bisikleti tüm bu süreçler sonrasında üretilmiş ve seri üretime girerek Avrupa pazarında kullanılmak üzere Almanya'ya gönderilmiştir (Şekil 1).

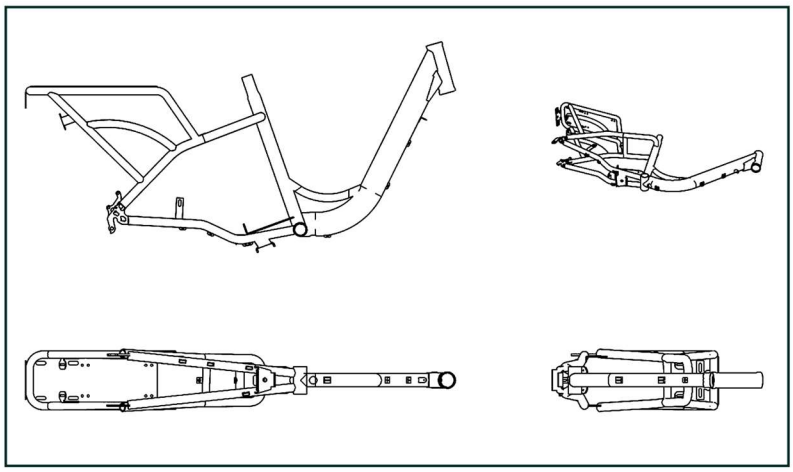


Şekil 1 VB7 Elektrikli Kargo Bisikleti

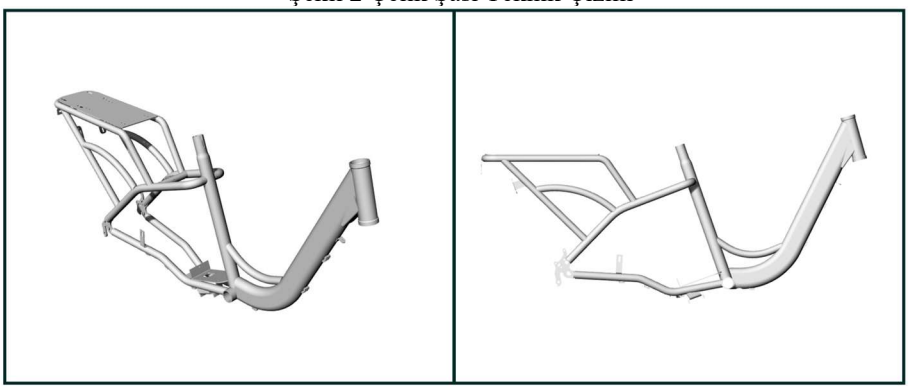
II. MATERYAL METOT

Projenin başlangıcında, Avrupa'daki kullanıcıların özel talepleri ve hedefleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Fosil yakıtla çalışan motorlu taşıtların tercih edilmesi hibrit veya elektrikli araçlara göre ya da bisiklet sürücüsü olarak, fiziksel çevreyi, toplumun sosyal ve kültürel etkileşimlerini ve insan sağlığını olumsuz yönde etkiler. Binek taşıt odaklı projelerin yaygın olduğu kentlerde, araç doluluk oranlarının düşük olması nedeniyle toplu taşımaya binen insan sayısı azalırken, ulaşımda geçen süre ve çevresel, toplumsal maliyetler artmaktadır. Dünya genelinde, kentsel ulaşımda geri gönüştürülebilir veya düşük hammadde tüketimine sahip olan temiz hammadde(enerji) kaynaklarının kullanılması ve çevre dostu ulaşım türlerinin teşvik edilmesi, özellikle yaya ve bisiklet kullanan kullanıcılar için olanakların geliştirilmesi, giderek daha fazla önemli olmaktadır [9]. Kuryelerin günlük operasyonel ihtiyaçları ve kullanım şekilleri titizlikle gözden geçirilmiştir. Pandemi sonrasında online alışveriş, günlük yaşamın bir parçası haline gelmiş ve bu durum kurye ve kurye firmalarının sayısında büyük bir artışa neden

olmuştur. Şu an günümüz dünyasında çeşitli sektörlerde hizmet veren kuryeler, her tür çeşide sahip olan her türlü siparişi müşterilere ulaştırmaktadır. Araştırmalar göstermektedir ki, kuryelik, hizmet sektöründe giderek çoğalan bir öneme sahip olduğu ve kuryelerin ekonomik ve sosyal haklar penceresinde çözülmesi gereken çokça sorunun bulunduğu ortaya konulmuştur [10]. Proje ekibi, özel talepleri ve kullanıcı gereksinimlerini temel alarak özelleştirilmiş elektrikli kargo bisikleti tasarımına odaklanmıştır. Aynı zamanda, elektrikli bisiklet kullanımının işletme maliyetlerine ve kurye ekibine etkileri değerlendirilmiştir. Bu aşamada, menzil performansını artırmak ve kullanım kolaylığı sağlamak için bisiklet tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Elektrikli bisikletlerin üretimi için uygun malzemeler, lityum iyon piller gibi belirlenmiştir. Motor-kuryeler arasında vasıf ayrımının olmadığı ve ücretlendirmenin tamamen sipariş sayısı üzerinden belirlendiği görülmüştür. Başka bir deyişle, 10 yıl deneyimi olan bir kurye ile bugün işe başlayan bir kurye arasında ücretlendirme konusunda herhangi bir fark bulunmamaktadır [11]. Bu durum kuryenin sipariş kabiliyetini arttırma isteğini doğurmuştur, ergonomik ve tasarımsal iyileştirmeler kuryelerin günlük teslimat sayısını artırarak kazanç sağlamalarına olanak sağlar.



Şekil 2 Çelik Şasi Teknik Çizim



Şekil 3 a) Bisiklet Şasisi Perspektif Görüntüsü, b) Bisiklet Şasisi Yan Görüntüsü

VB7 elektrikli kargo bisikleti tasarımları bilgisayar üzerinde 3D modellemeleri gerçekleştirilmiştir ve teknik çizimleri çıkarılarak prototipleri üretilmiştir (Şekil 2 – Şekil 3). Bu elektrikli bisiklette farklı sektördeki öncü tedarikçilerle iş birliği yapılarak, gerekli malzemelerin tedariki sağlanmıştır. Tasarımın doğruluğunu ve işlevselliğini kontrol etmek için özelleştirilmiş elektrikli kargo bisikleti olan VB7 prototipleri üretilmiştir. Prototipler, saha testlerine tabi tutularak bazı sorunlar ve kullanım kolaylığı gibi faktörler değerlendirilmiştir. Prototipler üzerinde ağırlık merkezi ayarlamaları yapılmış ve kullanıcı geri bildirimleri dikkate alınarak tasarım ve işlevselliğinde geliştirmeler gerçekleştirilmiştir. Prototiplerden yola çıkılarak seri üretim aşamasına geçilmiştir. Üretilen ürünler kalite kontrolünden geçirilmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. Ürünün faydalarını ve özelliklerini vurgulayan pazarlama materyalleri *hazırlanmış*, bisiklet kullanımının çevresel etkileri ve olumlu katkıları analiz edilmiştir

III. SONUÇLAR

Sonuç olarak, tasarlanan VB7 kargo bisikleti, uzun menzil, dayanıklılık ve ergonomi gibi önemli özellikleri ile rakiplerinden ayrışmaktadır. Bu özellikler, bisikletin kullanıcı deneyimini iyileştirirken aynı zamanda çevresel etkileri ve işletme maliyetlerine olan olumlu katkılarıyla da dikkat çekmektedir. Elektrikli kargo bisikletlerinin sürdürülebilir ulaşımın önemli bir bileşeni olduğu ve gelecekteki ulaşım çözümlerinde kritik bir rol oynayabileceği

sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, elektrikli kargo bisikletlerinin çevresel ve ekonomik avantajlarını vurgulamakla kalmamış, aynı zamanda bu bisikletlerin şehir içi ulaşımda etkili ve verimli bir alternatif olabileceğini de göstermiştir. Gelecekte, bu tür yenilikçi ulaşım araçlarının daha geniş çapta benimsenmesiyle birlikte karbon emisyonlarının azaltılması, şehir içi trafiğin azaltılması ve toplumsal ve ekonomik faydaların artırılması gibi önemli sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışma aynı zamanda, elektrikli araç teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından lityum iyon piller gibi yenilikçi enerji kaynaklarının önemini de vurgulamaktadır. Bu tür teknolojilerin geliştirilmesi ve benimsenmesi, fosil yakıt kaynaklı araçların neden olduğu çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir adım olabilir. Sonuç olarak, elektrikli kargo bisikletleri, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olarak değerlendirilmekte ve gelecekteki ulaşım sistemlerinin önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, bu tür bisikletlerin potansiyelini ve avantajlarını vurgulayarak, bu yönde yapılan yatırımların ve araştırmaların desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

IV. TARTIŞMA

Elektrikli kargo bisikletleri, şehir içi teslimat hizmetlerinde çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak öne çıkıyor. Ancak, bu potansiyelin tam olarak realize edilmesi için tasarımın önemi büyük. Tasarlanan VB7 gibi bisikletler, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve güvenliği artırmak için özel özelliklerle donatılmış durumda. Ancak, şehirlerdeki trafik sıkışıklığı ve rekabet, elektrikli kargo bisikletlerinin yaygınlaşmasını engelleyebilir. Bu nedenle, daha agresif pazarlama ve teşvik stratejileri benimsenmelidir. Ayrıca, altyapı geliştirmeleri ve mevzuat düzenlemeleri de bu bisikletlerin daha yaygın kullanılmasını sağlayabilir. Sonuç olarak, elektrikli kargo bisikletlerinin potansiyelini gerçekleştirmek için hem tasarım hem de destekleyici önlemler alınmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] Pearson, L., Reeder, S., Gabbe, B., & Beck, B. (2024). Designing for the Interested but Concerned: A qualitative study of the needs of potential bike riders. Journal of Transport & Health, 35, 101770.

[2] Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi, 3(1), 34-50.

[3] Altunsoy, Ü. (2021). Kargo Taşımacılık Sisteminde Elektrikli Araçlar Kullanımı Üzerine İnceleme. International Anatolia Academic Online Journal Sciences Journal, 7(2), 1-14.

[4] Lee, K., & Sener, I. N. (2023). E-bikes toward inclusive mobility: a literature review of perceptions, concerns, and barriers. Transportation research interdisciplinary perspectives, 22, 100940.

[5] Çetin, M. S., Karakaya, B., & Gençoğlu, M. (2021). Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(2), 755-763.

[6] Bora, Y. (2017). Elektrikli araç sistemlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[7] Ergüven, G. Ö., Koçak, E., & Güler, E. (2022). Investigation of the Sustainability of Lithium Ion Batteries from Environmental Technologies and Forecast Emissions for the Future. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (35), 507-513.

[8] Ertaş, C., & Kızılaslan, Z. (2015). Üretimde Ergonomi Çalışmalarıyla Verimliliğin Artırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), 651-657.

[9] Torun, F. E., Çodur, M. Y., & Bingül, Z. (2015). Ulaşımda Bisikletin Yeri ve Erzurum Teknik Üniversitesi Kampüs Alanı Bisiklet Yolu Önerisi. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi(1), 62-66.

[10] Kavurmacı, A. (2023). Moto Kuryelerin Çalışma Koşullarını İyileştirecek Faktörlerin Belirlenmesi: Nitel Bir Araştırma. Sosyal Güvenlik Dergisi, 13(1), 33-54.

[11] Yertüm, U., & Balcı, B. (2023). Motor-Kurye Çalışanlarının Çalışma Koşullarına Yönelik Bir Araştırma: İstanbul Örneği. Akademik İncelemeler Dergisi, 18(2), 328-350.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Epileptic Seizure Classification Using Local Binary Patterns and Convolutional Neural Networks from EEG Signals

Bahadır Arabacı[a,], Kemal Polat[a]*

[a]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu/Turkey.
[*] **Corresponding Author: bahadirarabaci@yandex.com**

ABSTRACT

Epilepsy is commonly diagnosed by Electroencephalography (EEG) signals. Non-stationary features such as noise and significant background activity are often present in the data. Due to the complexity of the signals, diagnosing epilepsy is challenging. This reduces performance in many real-world applications, including the diagnosis of epilepsy. This work explores the application of deep learning to EEG signal analysis for seizure prediction, aiming to address the limitations of manual analysis. The One-Dimensional Local Binary Pattern (1D-LBP) is introduced as a useful technique for feature extraction from raw EEG data. This study investigates the challenges of using EEG signals to diagnose seizures and explores the potential of artificial intelligence to improve seizure prediction. The performance of the proposed method was evaluated using the CHB-MIT Scalp EEG database, utilizing the LBP and feature extraction techniques. The proposed Convolutional Neural Network (CNN) model achieved notable results on the test dataset, with 94.59% accuracy, 99.24% precision, 94.58% recall, and 96.86% F1 score. The promising results of the CNN model suggest its potential for accurate binary classification in seizure detection.

Keywords: *Convolutional Neural Networks, EEG Signals, Epilepsy, Local Binary Pattern, Seizure Classification.*

I. INTRODUCTION

The World Health Organization (WHO) estimates that 50 million people worldwide suffer from epilepsy. Approximately 180,000 new cases are reported annually worldwide. The fact that approximately 75% of epileptics lack access to healthcare is alarming. Only 30% of persons with epileptic seizures are younger than 70 years old [1].

Both adults and children can suffer from the neurological condition known as epilepsy. Sudden, recurrent epileptic seizures may be one of its characteristics. Basically, this seizure disorder is caused by a transient, brief disruption in a specific group of brain cells electrical activity. Epileptic seizures are caused by excessive electrical activity within the brain's neuronal networks [2]. Seizures are common in epileptic patients, which can result in body movement abnormalities, mild depression, amnesia, and unconsciousness. It can even be fatal in extreme circumstances [1]. Due to their frequent seizures, epileptic patients may suffer from persistent headaches, mild depression, amnesia, and even unconsciousness. It can even result in death and abnormal body movement [3]. Based on the order in which the events occur, epilepsy is classified into four stages: interictal, preictal, ictal, and postictal. The ictal stage happens when an epileptic seizure happens, the postictal stage happens right after the seizure, and the preictal stage happens one to fifteen minutes before a seizure. The interval between two seizures is known as the interictal stage [4].

The diagnostic method for epilepsy that is most used is electroencephalography [5]. An important tool for diagnosing epilepsy is EEG, a noninvasive method of gathering data about the electrical activity of the brain. For the neurologist, visual diagnosis of epileptic seizures from an EEG record is a laborious and time-consuming process [1]. A qualified neurologist must visually analyze a sizable amount of EEG recordings; the neurologist's experience and skill level will determine how accurate the analysis is. As a result, visual inspection is an extremely laborious and time-consuming procedure that is prone to subjective judgment errors [6]. Due to subjective analysis, visual inspection can result in disagreements among specialists. Furthermore, patient variability in activity can make seizure patterns in EEG data easy to miss or mistake for artifacts or background noise [6], [7]. Managing artifacts in EEG signals is a major challenge for

neurologists. These artifacts mimic EEG seizure signals by overlapping with different bio-signals, such as eye movement, muscle movement, cardiogenic movement, or environmental noise, which results in false data [2]. To address the laborious manual detection of seizures and the potential for human errors, researchers have explored novel approaches for predicting seizures by integrating artificial intelligence with epileptic EEG. The emergence of deep learning and machine learning in the analysis of EEG signals has prompted research into seizure prediction using deep learning methods.

A new model leveraging Local Binary Pattern (LBP) and Local Ternary Pattern (LTP) features uses deep learning to classify heart sounds. This effective substitute for expensive and time-consuming conventional methods extracts features, creates a hybrid vector and employs a 1D-CNN for classification [8]. The study offers an effective technique for extracting features from unprocessed EEG signals that makes use of 1D-LBP. First, 1D-LBP features are extracted, and then various machine learning algorithms are used for classification. The suggested method is positioned as a flexible feature extraction scheme that can be applied to different EEG signal categories. The results demonstrate high accuracy in classifying epileptic EEG signals [9]. A spectrogram-based approach for identifying EEG signals in biomedicine and brain-computer interfaces is proposed. Using spectral peaks and the Short-Time Fourier Transform (STFT), three feature extraction methods are presented. Evaluation on the Bonn University dataset using machine learning algorithms achieves high accuracy using fewer features [10]. In this paper, a graph-based community detection algorithm, LBP and Morse Wavelet are used to introduce an automated framework for the detection of newborn seizures. The goal of the ensemble classifier approach is to close the gap in automated seizure detection for neurologists by improving EEG-based seizure recognition [11]. A new approach to feature extraction is presented, which combines Local Gabor Binary Patterns on EEG channels with Sparse Rational Decomposition. Using optimal coefficients, the EEG record channels are divided into 8 sparse rational components. After that, a modified 1D Local Gabor Binary Patterns operator is used, and then the data is downscaled [12]. In order to classify EEG in patients with epilepsy, this study presents a hybrid LBP-Wavelet approach that emphasizes multiple ictal patterns. Discrete Wavelet Transform and LBP are used in the method to filter and transform EEG signals [13]. The method for classifying seizure and seizure-free EEG signals using 1D-LBP features and Gabor filters is proposed in this paper. Histograms of 1D-LBPs are used to analyze segments of the processed EEG signal, and a nearest neighbor classifier is used to determine the category based on the scores obtained from the histogram matching [14]. An enhanced 1D-LBP is presented in this work for reliable ECG-based human recognition. 1D-LBP captures micro and macro patterns in heartbeat activity, addressing issues like sensitivity to noise and variability [15]. The technique uses a pyramid of difference of Gaussian filtered signals to identify important points at multiple scales in EEG signals. At these points, LBPs make up the feature set, which a support vector machine classifies. The methodology is tested on four classification problems and makes use of the University of Bonn EEG database [16]. The techniques, which create histograms from extracted patterns and feed the feature vectors to the classifier, are computationally effective [17].

The goal of our study is to process EEG signals to identify epilepsy seizures. Firstly, EEG signals and relevant appropriate labels are selected from the dataset, and a dataset is created consisting of examples representing normal conditions with a certain probability and examples representing epileptic seizures. To extract features of signals, LBP in the time domain of each channel is calculated. A neural network model is constructed and trained, and training and test examples are identified. After that, a CNN model is trained using this data. On the test set, the trained model is assessed and predictions are generated.

II. MATERIALS AND METHOD

A. Dataset

In this study, we utilized the CHB-MIT Scalp EEG database from PhysioNet [18]. EEG recordings from kids with hard-to-control seizures are included in this database. Every pediatric patient was observed using 16-bit quantization at a sampling rate of 256 Hz. In recognition of the fact that different patients may have 18 or 23 available channels, we used 18 common channels as the standard configuration. We have acquired the EEG records from 23 pediatric patients. Male patients range in age from 3 to 22 years, and female patients range in age from 1.5 to 19 years. Using 19 electrodes and a ground attached to the scalp surface, signals were recorded simultaneously through various channels (FP1-F7, F7-T7, T7-P7, P7-O1, FP1-F3, F3-C3, C3-P3, P3-O1, FP2-F4, F4-C4, C4-P4, P4-O2, FP2-F8, F8-T8, T8-P8, P8-O2, FZ-CZ, CZ-PZ). Signals were not recorded in between sequentially numbered signal files due to hardware limitations. These disruptions usually last 10 seconds or less, but they can also occasionally last much longer. The signal files are typically made up of digitalized EEG signals that last for an hour. Signal files generally comprised one-hour digitalized EEG signals, except for case chb10 (two hours) and cases chb04, chb06, chb07, chb09, and chb23 (four hours). Files with seizure reports may occasionally be shorter. The International 10-20 system of EEG electrode positions and nomenclature guided these recordings.

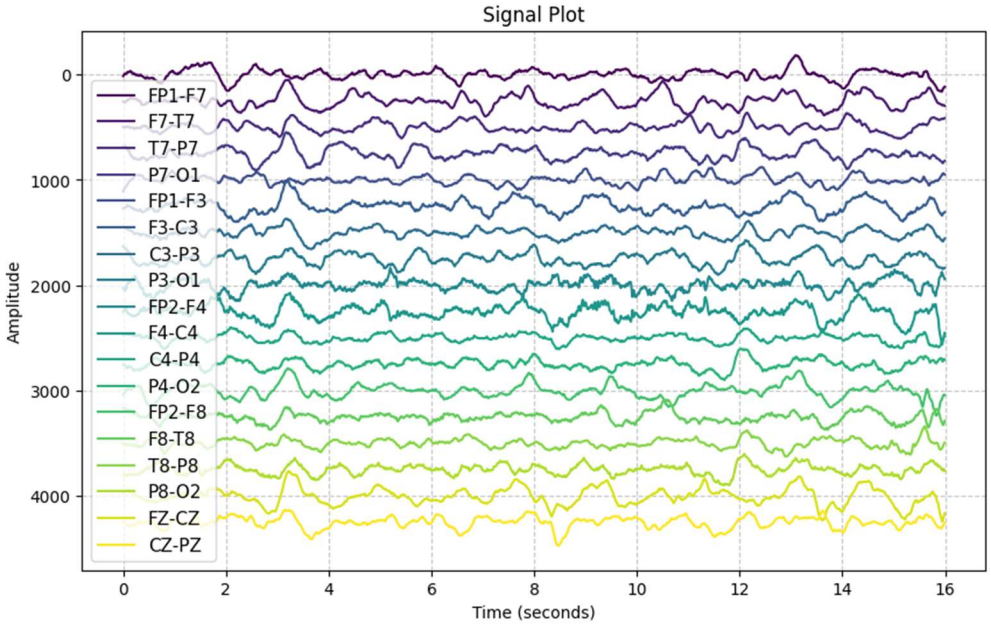


Fig. 1: Example of an EEG Signal from the Dataset Showing Time Intervals

B. Preprocess

Dataset for seizure detection by processing data obtained from EEG signals. In the preprocessing loop iterates through a list of training files. For each file, it reads the raw data and checks if the channel labels meet specified criteria. If the labels are appropriate, the script segments the data into time windows with specified steps, calculating the number of samples with and without seizures based on a defined proportion. After determining the sample sizes, the script initializes arrays to store signal samples and seizure labels. In the data extraction loop, it iterates through the training files again, processing and extracting signal samples. For each file, it matches channel labels, renames channels if necessary, and extracts seizure-related information. Adds the seizure and non-seizure samples to the previously initialized arrays, updating the counter accordingly. Signals lasting 8 seconds are sequentially extracted at 4-second intervals. Each 8-second signal set is marked with a seizure ratio indicating its degree of overlap with a seizure timeframe. 80% of the dataset was allocated for training, and 20% was allocated for testing.

C. Local Binary Pattern

An image operator called the LBP [19] converts an image into a set of integer labels that represent its small-scale features. Usually shown in a histogram, these labels are used for additional image analysis. Because of its simple computation and effective discrimination, the LBP texture operator is widely used in many different applications.

$$t = G(x_i) - G(x) \tag{1}$$

$$LBP(x) = \sum_{i=0}^{P} S(t)2^i \; where \; S(t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ 0, & t \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

Many strategies have been put forth to address artifacts [20]. The LBP method revolves around defining 3x3 neighborhoods and generating 8-bit codes based on the 8 pixels surrounding them. As LBP specifically operates on grayscale images, the input image must be converted to grayscale initially. For each pixel in the grayscale image, a neighborhood is selected to determine the LBP value, and the corresponding value in the LBP mask is updated accordingly. The comparison involves assessing the central pixel in relation to its surrounding pixels. By moving in either a clockwise or counterclockwise manner, each pixel is compared with its 8 neighbors. The current pixel is assigned a value of 1 if it is greater than or equal to the neighboring pixel; otherwise, it is set to 0.

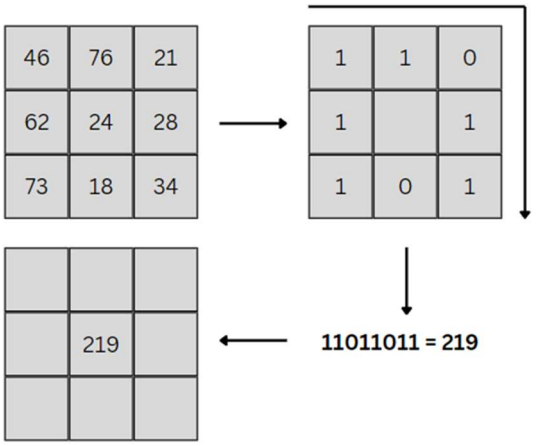


Fig. 2: LBP Operation

LBP frequently showcases fundamental patterns referred to as uniform patterns, characterized by a consistent circular structure with minimal spatial transitions [21]. The extracted texture features from the acquired images are used with the LBP to detect abnormalities in the EEG signals during seizures.

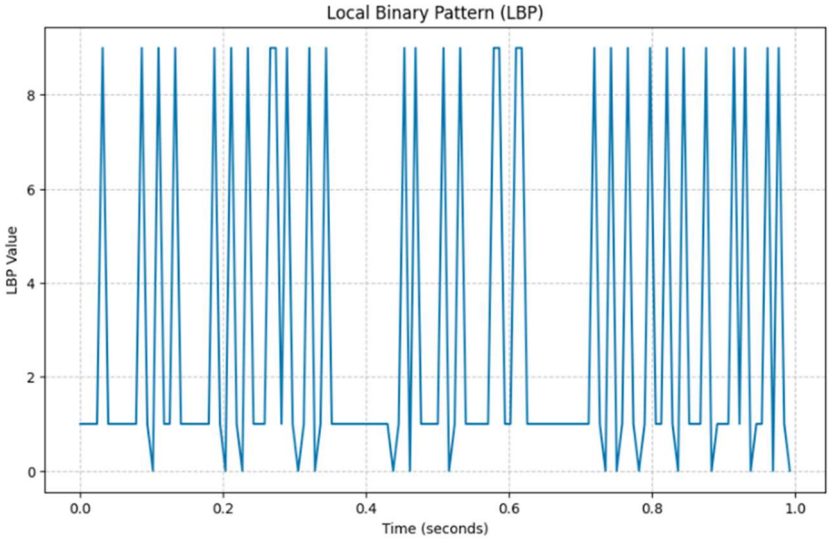


Fig. 3: Example of LBP Applied Signal

D. Convolutional Neural Network

Convolutional Neural Networks have two primary parts for automatically extracting features and classifying them. Convolution, pooling, and fully connected layers are the three layers that make up a typical CNN architecture [22]. Convolution layers process the input data by applying specific filters. The input's spatial dimensions are decreased for later convolution layers by pooling layers. The resulting feature maps are transformed into a feature vector for classification purposes by fully connected layers. The CNN used in this study has three convolution layers, each of which is followed by a maximum pooling layer and a rectified linear activation function (ReLU). Important features are extracted from the data by the 1D convolutional layer using a 1D kernel with 32 filters and the ReLU activation function. Essential information is preserved by shrinking data by a factor of two using the maximum pooling layer. Twenty percent of random neurons are disabled to avoid overfitting. One dimension is created from 1D data to prepare it for fully connected layers. Every mini-group's activation is standardized to facilitate quicker and more reliable model training. To compute class probabilities, the model consists of a layer with 64 neurons, a ReLU activation function, and L2 regularization. This layer is followed by a layer with 1 neuron and a sigmoid activation function. With a learning rate of 0.001, the Adam optimization algorithm was applied. Half of the learning rate is achieved if the verification loss doesn't change after two epochs. To expedite optimization, the model is trained for 50 epochs, processing 32 data samples each epoch. For binary classification, binary cross-entropy loss is used, and model success is determined by accuracy.

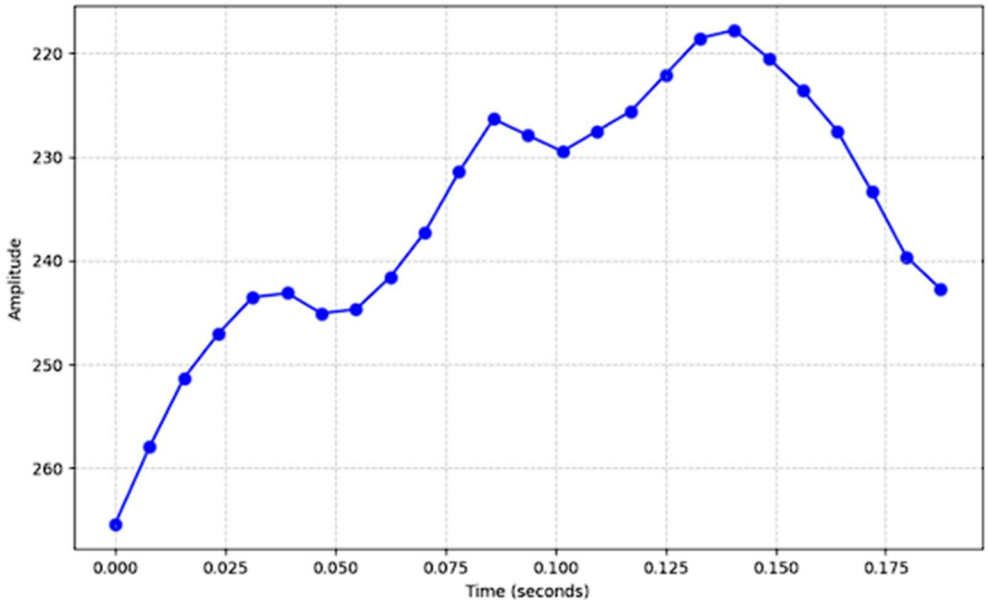


Fig. 4: Example of 1D-LBP Processed EEG Signal Input

Table 1. Proposed CNN Model

Layer Number	Layer Name	Layer Type	Kernel size
1	Input	Local Binary Features	-
2	Conv1D	Convolution	32 x 1-1 x 1
3	ReLU	ReLU	-
4	MaxPooling1D	MaxPooling	2x1-2
5	Dropout	Dropout	20% dropout
6	BN	Batch normalization	-
7	Conv1D	Convolution	64 x 1-1 x 1
8	ReLU	ReLU	-
9	BN	Batch normalization	-
10	Conv1D	Convolution	32 x 1-1 x 1
11	ReLU	ReLU	-
12	Dropout	Dropout	20% dropout
13	FC	Fully connected	16 neurons
14	Output	Sigmoid	-

III. RESULTS

Evaluation criteria including accuracy, precision, recall, and F1-Score were applied to the results of the suggested approach. The outcomes demonstrate that the suggested CNN model performs admirably on the benchmark dataset. The test accuracy of 0.9459 suggests that the model can accurately classify the majority of unseen samples. Values for precision (0.9924) and recall (0.9458) suggest that there is little chance of the model misclassifying positive and negative examples. The model performs well, as evidenced by the F1 score (0.9686), which also shows that recall and precision are well-balanced. The study's findings show how well the suggested CNN model performs in binary classification. High performance was attained by the model on the test dataset.

IV. DISCUSSION

Before the introduction of deep learning, researchers focused on finding the most representative features of EEG signals in epileptic patients. With the advancement of computing power, researchers have focused on finding optimal representations that provide more information to neural networks.

Our proposed deep learning method of classifying epileptic seizures from EEG signals has several advantages over previous approaches. Proposed method increases the discriminative power of the model by efficiently capturing important texture features using Local Binary Patterns for feature extraction. Compared to conventional techniques, Convolutional Neural Networks for classification offer more accurate and efficient performance through automatic feature extraction. Testing our method on the CHB-MIT Scalp EEG database yields encouraging results that show how well it works for binary classification. All things considered, our approach may help medical professionals diagnose and treat epileptic patients more quickly, leading to better patient outcomes

and care. Subsequent investigations could concentrate on enhancing the model architecture and verifying its efficacy on more extensive datasets to augment its clinical relevance.

V. CONCLUSION

Epileptic seizure detection is a classification problem that has been exhaustively studied over the last decades. This study investigated the potential of deep learning for automatic seizure classification using EEG signals. We proposed a novel approach that utilizes one-dimensional local binary patterns for feature extraction and a convolutional neural network for classification. The proposed convolutional neural network model demonstrated its effectiveness in binary classification of seizure and non-seizure EEG signals by obtaining results on the CHB-MIT Scalp EEG database.

REFERENCES

[1] J. Prasanna, M. S. P. Subathra, M. A. Mohammed, R. Damaševičius, N. J. Sairamya, and S. T. George, "Automated epileptic seizure detection in pediatric subjects of chb-mit eeg database—a survey," J Pers Med, vol. 11, no. 10, Oct. 2021, doi: 10.3390/jpm11101028.

[2] M. K. Alharthi, K. M. Moria, D. M. Alghazzawi, and H. O. Tayeb, "Epileptic Disorder Detection of Seizures Using EEG Signals," Sensors, vol. 22, no. 17, p. 6592, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22176592.

[3] A. Shahidi Zandi, R. Tafreshi, M. Javidan, and G. A. Dumont, "Predicting Epileptic Seizures in Scalp EEG Based on a Variational Bayesian Gaussian Mixture Model of Zero-Crossing Intervals," IEEE Trans Biomed Eng, vol. 60, no. 5, pp. 1401–1413, May 2013, doi: 10.1109/TBME.2012.2237399.

[4] R. S. Fisher and A. M. Bonner, "The Revised Definition and Classification of Epilepsy for Neurodiagnostic Technologists," Neurodiagn J, vol. 58, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2018, doi: 10.1080/21646821.2018.1428455.

[5] L. M. Patnaik and O. K. Manyam, "Epileptic EEG detection using neural networks and post-classification," Comput Methods Programs Biomed, vol. 91, no. 2, pp. 100–109, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.cmpb.2008.02.005.

[6] X. Hu, S. Yuan, F. Xu, Y. Leng, K. Yuan, and Q. Yuan, "Scalp EEG classification using deep Bi-LSTM network for seizure detection," Comput Biol Med, vol. 124, p. 103919, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compbiomed.2020.103919.

[7] C. Gómez, P. Arbeláez, M. Navarrete, C. Alvarado-Rojas, M. Le Van Quyen, and M. Valderrama, "Automatic seizure detection based on imaged-EEG signals through fully convolutional networks," Sci Rep, vol. 10, no. 1, p. 21833, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78784-3.

[8] M. B. Er, "Heart sounds classification using convolutional neural network with 1D-local binary pattern and 1D-local ternary pattern features," Applied Acoustics, vol. 180, p. 108152, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108152.

[9] Y. Kaya, M. Uyar, R. Tekin, and S. Yıldırım, "1D-local binary pattern based feature extraction for classification of epileptic EEG signals," Appl Math Comput, vol. 243, pp. 209–219, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.amc.2014.05.128.

[10] R. Ramos-Aguilar, J. A. Olvera-López, I. Olmos-Pineda, and S. Sánchez-Urrieta, "Feature extraction from EEG spectrograms for epileptic seizure detection," Pattern Recognit Lett, vol. 133, pp. 202–209, May 2020, doi: 10.1016/j.patrec.2020.03.006.

[11] M. Diykh et al., "Texture analysis based graph approach for automatic detection of neonatal seizure from multi-channel EEG signals," Measurement, vol. 190, p. 110731, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.110731.

[12] K. Samiee, P. Kovács, and M. Gabbouj, "Epileptic seizure detection in long-term EEG records using sparse rational decomposition and local Gabor binary patterns feature extraction," Knowl Based Syst, vol. 118, pp. 228–240, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.knosys.2016.11.023.

[13] K. A. Khan, S. P. P., Y. U. Khan, and O. Farooq, "A hybrid Local Binary Pattern and wavelets based approach for EEG classification for diagnosing epilepsy," Expert Syst Appl, vol. 140, p. 112895, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2019.112895.

[14] T. S. Kumar, V. Kanhangad, and R. B. Pachori, "Classification of seizure and seizure-free EEG signals using local binary patterns," Biomed Signal Process Control, vol. 15, pp. 33–40, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.bspc.2014.08.014.

[15] M. Benouis, L. Mostefai, N. Costen, and M. Regouid, "ECG based biometric identification using one-dimensional local difference pattern," Biomed Signal Process Control, vol. 64, p. 102226, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.bspc.2020.102226.

[16] A. K. Tiwari, R. B. Pachori, V. Kanhangad, and B. K. Panigrahi, "Automated Diagnosis of Epilepsy Using Key-Point-Based Local Binary Pattern of EEG Signals," IEEE J Biomed Health Inform, vol. 21, no. 4, pp. 888–896, Jul. 2017, doi: 10.1109/JBHI.2016.2589971.

[17] S. Ramakrishnan, A. S. Muthanantha Murugavel, P. Sathiyamurthi, and J. Ramprasath, "Seizure Detection with Local Binary Pattern and CNN Classifier," J Phys Conf Ser, vol. 1767, no. 1, p. 012029, Feb. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1767/1/012029.

[18] A. H. Shoeb and J. V Guttag, "Application of Machine Learning To Epileptic Seizure Detection," in International Conference on Machine Learning, 2010. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11141395

[19] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa, "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, Jul. 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623.

[20] T. Radüntz, J. Scouten, O. Hochmuth, and B. Meffert, "EEG artifact elimination by extraction of ICA-component features using image processing algorithms," J Neurosci Methods, vol. 243, pp. 84–93, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jneumeth.2015.01.030.

[21] S. N. Jothiraj, T. G. Selvaraj, B. Ramasamy, N. P. Deivendran, and S. M.S.P, "Classification of EEG signals for detection of epileptic seizure activities based on feature extraction from brain maps using image processing algorithms," IET Image Process, vol. 12, no. 12, pp. 2153–2162, Dec. 2018, doi: 10.1049/iet-ipr.2018.5418.

[22] A. Saidi, S. Ben Othman, and S. Ben Saoud, "A novel epileptic seizure detection system using scalp EEG signals based on hybrid CNN-SVM classifier," in 2021 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/ISIEA51897.2021.9510002.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Derin Öğrenme Kullanılarak Yangına Maruz Kalmış Betonarme Kolonlarda Yapısal Hasar Tespiti: İvme Verileri ile Bir Çalışma

Muhammed Serdar AVCI[a], Emre Ercan[a], Ayhan Nuhoğlu[a], Bengi Arısoy[a], Çağlayan Hızal[a], Mahmut Pekedis[b]*

[a]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye.
[b]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: muhammed.serdar.avci@ege.edu.tr

ÖZET *(Cambria, 10)*

Bu makale, ivme verilerini kullanarak yangına maruz kalan betonarme kolonlardaki yapısal hasarın erken tespiti için derin öğrenme tekniklerinin, özellikle de Evrişimsel Sinir Ağlarının (ESA'lar) kullanımını araştırmaktadır. Yangına maruz kalmadan kaynaklanan yapısal hasarlar güvenlik riskleri oluşturabilir ve maliyetli onarımlar gerektirebilir, bu da erken tespiti bu yapıların güvenliği ve uzun ömürlülüğü için kritik hale getirir. Çalışma dört numuneden oluşmaktadır ve yangın testleri yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra ivme verileri toplanmıştır. Her numune, ivme verilerinin toplandığı ve derin öğrenme modelleri için girdi olarak kullanıldığı sekiz teste tabi tutulmuştur. İvme verileri kullanılarak yangına maruz kalmış betonarme kolonlarda erken hasar tespiti için ESA'ların uygulanması oldukça doğru sonuçlar vermiştir. CNN modelleri, sağlıklı ve hasarlı kolonları yüksek bir hassasiyetle başarılı bir şekilde ayırt etmiştir. ESA'ların ortaya koyduğu tespit kabiliyeti, yangına maruz kalan betonarme yapılar için güvenliği önemli ölçüde artırma ve onarım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir. Bu bulgular, derin öğrenme tekniklerinin ve ivme verilerinin, yangına maruz kalmanın neden olduğu yapısal güvenlik açıklarının proaktif olarak ele alınmasındaki etkinliğinin altını çizmekte ve böylece daha güvenli ve daha esnek altyapı yönetimi uygulamalarına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Yangına Maruz Kalma, Hasar Tespiti, Derin Öğrenme, Yapı Sağlığı İzleme*

Structural Damage Detection on Fire-Exposed Reinforced Concrete Columns Using Deep Learning: A Study with Acceleration Data

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

This paper investigates the use of deep learning techniques, specifically Convolu-tional Neural Networks (CNNs), for the early detection of structural damage in fire-exposed reinforced concrete columns using acceleration data. Structural damage resulting from fire exposure can pose safety risks and require costly repairs, mak-ing early detection critical for the safety and longevity of these structures. The study comprises four specimens, and acceleration data is collected both before and after the fire tests are conducted. Each specimen undergoes eight tests, during which acceleration data is collected and utilized as input for the deep learning models. The application of Convolutional Neural Networks (CNNs) for early damage detection in fire-exposed reinforced concrete columns using acceleration data yielded highly accurate results. The CNN models successfully distinguished between healthy and damaged columns with a high level of precision. The detection capability demonstrated by the CNNs has the potential to significantly enhance safety and reduce repair costs for fire-exposed reinforced concrete structures. These findings underscore the effectiveness of deep learning techniques and ac-celeration data in proactively addressing structural vulnerabilities caused by fire exposure, thereby contributing to safer and more resilient infrastructure management practices.

Keywords: *Fire Exposure, Damage Detection, Deep Learning, Structural Health Monitoring*

I. GİRİŞ

In recent years, the field of structural health monitoring (SHM) has witnessed significant advancements with the emergence of sophisticated data-driven techniques, particularly in the realm of deep learning [1]. Among these, Convolutional Neural Networks (CNNs) have shown remarkable potential in various domains, including computer vision and natural language processing. In this context, the present paper delves into the application of CNNs for the detection of structural damage in fire-exposed reinforced concrete beams using acceleration data. The study's focus on fire-exposed structures is of paramount importance, considering the potential safety risks and substantial repair expenses associated with structural damage resulting from fire incidents.

Fire exposure poses a critical threat to the integrity of reinforced concrete structures, as elevated temperatures can induce material degradation and weakening, which, if not addressed promptly, may lead to catastrophic failures [2]. Detecting damage at its incipient stages is, therefore, crucial for safeguarding the structural reliability and longevity of these infrastructures. While traditional inspection methods play a significant role in structural evaluation, they often face limitations in terms of real-time monitoring and early warning capabilities. Here, the incorporation of deep learning techniques, specifically CNNs, offers a promising avenue to overcome these challenges and bolster the capabilities of SHM systems. The utilization of machine learning and deep learning algorithms in SHM has gained considerable traction in recent years, demonstrating their potential to revolutionize how structural assessment is conducted. In this context, various studies have explored the application of CNNs to a diverse range of SHM problems, including damage detection, condition assessment, and failure prediction. For instance, Ding et.al., (2023) employed CNNs to identify crack patterns in concrete structures from images captured by unmanned aerial vehicles, achieving notable success in automated crack detection. [3]

Moreover, with the increasing accessibility of sensors and data acquisition systems, there has been a growing emphasis on incorporating real-time data streams into SHM methodologies. Acceleration data, being a fundamental parameter for understanding structural behavior, has emerged as a crucial input for deep learning models in damage detection applications. Researchers such as Chamangard et al. (2022) and Abdeljaber et al. (2018) have effectively employed acceleration data in CNN-based SHM approaches for civil structures, showcasing the feasibility of such techniques for structural health assessment [4], [5].

Despite the promising results achieved in the broader SHM domain, few studies have specifically addressed the early detection of structural damage in fire-exposed reinforced concrete beams using deep learning techniques.[6]–[8] This paper seeks to fill this gap by conducting a comprehensive investigation that includes 4 specimens, categorized into healthy and damaged beams, and subjected to eight tests each. By collecting acceleration data during these tests and harnessing the power of CNNs, the study aims to assess the capability of these models in accurately identifying and distinguishing between healthy and damaged beams.

In light of the aforementioned research gap, the primary objective of this study is to validate the applicability and effectiveness of CNNs in the early detection of fire-induced structural damage. The outcomes of this investigation hold immense potential in bolstering infrastructure management practices by enabling proactive decision-making and targeted repairs. The successful implementation of CNN-based damage detection in fire-exposed reinforced concrete beams could substantially reduce repair costs and enhance the overall safety and resilience of critical structures. Ultimately, the findings presented in this paper underscore the significance of harnessing deep learning techniques and acceleration data to address structural vulnerabilities arising from fire exposure, ushering in a new era of safer and more reliable infrastructure management practices.

.

II. MATERYAL METOT

In the laboratory, four samples of 20x20x320 cm^3 reinforced concrete elements were produced to conduct forced vibration tests under laboratory conditions. The samples were reinforced with S420 structural steel, and C30 concrete was used.

For each sample, four Ø16 structural steel bars and 31 Ø8 stirrups were placed at 10 cm intervals. After placing the reinforcements, three thermocouples with thermal insulation and five strain gauges were positioned around the reinforcements. Following these steps, the concrete pouring process was carried out.

A. Forced Vibration Test

For the pre-fire forced vibration test, the samples were positioned as simply supported beams. Subsequently, four accelerometers connected to the NI cDAQ-9174 Data Acquisition Device were attached to the bottom of the sample at 640 mm intervals using a thin epoxy layer. A Modal Shaker was placed at the middle part of the sample. This shaker was connected to the YMC LA-100 Power Amplifier, and the amplifier was connected to the Agilent 33210A 10MHz Signal Generator, which, in turn, was connected to the computer. The experiment proceeded as follows: random signals generated on the computer between 0 and 350 Hz using MATLAB were sent to the signal generator. These signals, converted from digital to analog in the signal generator, were then transmitted to the amplifier. The power of these signals, increased by the amplifier up to 2.1 V_{rms}, was further transmitted to the Modal Shaker. The forced vibrations produced by the iron rod with a force sensor connected to the Modal Shaker were measured by the accelerometers. The measured data was transferred to the data acquisition device. The data collected from the data acquisition device was gathered on the computer using the LabVIEW 2011 program. Eighteen sets of data were collected for each sample.

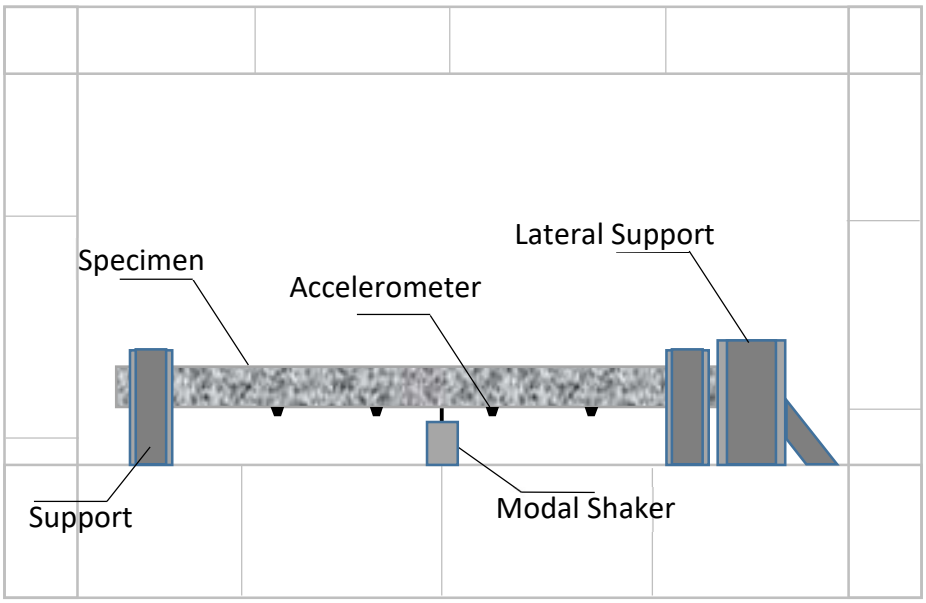


Figure 1 Experimental Setup

B. Controlled Fire Exposure Test

After conducting pre-fire forced vibration tests, the samples were later placed with 20 pieces of 15x25x60 cm^3 aerated concrete blocks and 100 pieces of firebrick tiles to provide heat distribution and prevent outward spread. (Figure 2) Subsequently, each sample was positioned as a simply supported beam within this arrangement. Following this step, a Turbo Triggered Insulation Shawl - Nozzle with a 5 cm diameter and 75 cm length, along with 4 pieces of 12 kg LPG cylinders, were used to expose the samples to high temperatures from their lower surfaces for 90 minutes. Temperature measurements were recorded at 15-minute intervals. The oven temperature reaches above 500°C. Due to the exposure of the columns to the fire from their lower surfaces, the temperatures in the lower part are higher compared to the middle and upper parts. The lower part reaches approximately 300°C, while the middle and upper parts are around 100°C as it can be see from **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**-4.

.

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 1 During Fire Exposure

Time (min)	***Oven (⁰C)***	***Upper Thermocouple (⁰C)***	***Middle Thermocouple (⁰C)***	***Lower Thermocouple (⁰C)***
0	28.5	29	30	30
15	347.3	43	55	100
30	364.4	58	66	125
45	389.1	65	74	157
60	436.2	80	86	191
75	471.1	100	101	255

90	500.7	110	130	295

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 2 During Fire Exposure

Time (min)	***Oven (^0C)***	***Upper Thermocouple (^0C)***	***Middle Thermocouple (^0C)***	***Lower Thermocouple (^0C)***
0	29.5	30	30	30
15	389.5	42	44	138
30	405.2	71	76	227
45	432.2	95	95	242
60	481.5	103	109	308
75	520.4	111	121	352
90	545.2	126	140	374

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 3 During Fire Exposure

Time (min)	***Oven (^0C)***	***Upper Thermocouple (^0C)***	***Middle Thermocouple (^0C)***	***Lower Thermocouple (^0C)***
0	28.5	30	29	30
15	409	32	63	139
30	409.6	45	102	199
45	439.6	62	118	253
60	491.9	79	147	300
75	519.4	94	170	340
90	550.4	110	193	374

Tablo 1. Temperature Measurements for Specimen 4 During Fire Exposure

Time (min)	***Oven (^0C)***	***Upper Thermocouple (^0C)***	***Middle Thermocouple (^0C)***	***Lower Thermocouple (^0C)***
0	30.4	30	30	31
15	446.1	32	49	58
30	462.1	47	78	82
45	476.2	61	91	94
60	501	79	106	106
75	528.8	92	110	115
90	552.5	113	129	129

After conducting the fire exposure tests, all samples were subsequently subjected to the forced vibration test once more. The forced vibration test aimed to assess the structural integrity and dynamic response of the specimens after exposure to fire conditions.

By performing the forced vibration test post-fire, researchers could evaluate any potential changes in the dynamic behavior of the specimens due to the fire-induced structural damage using deep learning methods. This test provided valuable insights into the effects of fire on the mechanical properties, damping characteristics, and natural frequencies of the columns.

The comparison of the pre-fire and post-fire forced vibration test results allowed for a comprehensive analysis of the specimens' structural performance and potential degradation caused by the fire exposure. The data obtained from this phase of the study contributed significantly to understanding the resilience and post-fire behavior of the columns, aiding in the development of effective post-fire inspection and rehabilitation strategies for fire-affected structures.

By combining the results of the fire exposure tests and the subsequent forced vibration tests, the research aimed to enhance the overall understanding of the structural response and performance of columns subjected to fire incidents. These findings have implications for improving fire safety measures, structural design considerations, and maintenance practices to ensure the long-term safety and reliability of structures exposed to fire hazards.



Figure 2. Fire Exposure Oven

C. Preparation of the Dataset

The collected acceleration data from both healthy and damaged reinforced concrete columns is a crucial component of our structural damage classification study. Each data point in the dataset is associated with a corresponding label indicating whether it belongs to the "Healthy" class (labeled as 0) or the "Damaged" class (labeled as 1). This labeled dataset serves as the foundation for training and evaluating our Convolutional Neural Network (CNN) model.

After conducting the vibration tests, two groups of accelerometer data were created: one for healthy specimens and another for damaged specimens. Each group consists of 4 specimens, with each specimen undergoing 8 tests. In total, there were 32 tests conducted for each class. The channels in the data are represented as follows: Ch_1: Time (s), Ch_2: Force, Ch_3, Ch_4, Ch_5, and Ch_6: Acceleration (g).

The primary objective of this study is to classify the specimens as either healthy or damaged using the obtained data. To achieve this, we utilize a 1D convolutional neural network. In machine learning models, especially neural networks, the dataset is typically split into three subsets: the training set, validation set, and test set. In this specific scenario, the 32 tests conducted for both healthy and damaged specimens were partitioned as follows: the first 24 tests were designated as the training set, while the remaining 8 tests were further divided, with 4 tests allocated to the validation set and the other 4 to the test set. Total number of training examples for CNN is presented in Figure 3. Training examples' acceleration data for both healthy and damaged column specimens is presented in Figure 4. As it can be seen from the figure that the there is a clear difference in the acceleration data of damaged and healthy specimens.

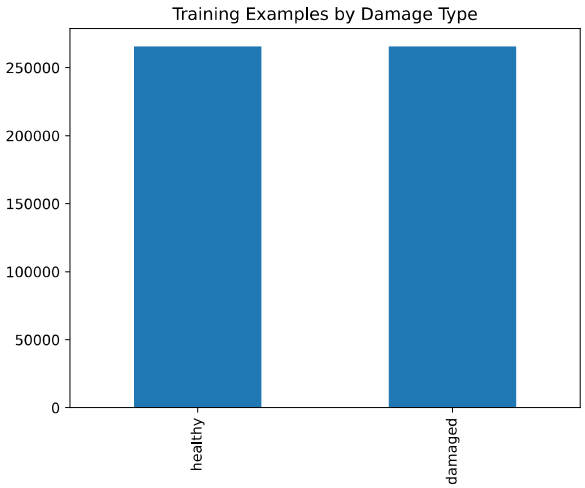


Figure 3 Training examples by Damage Type

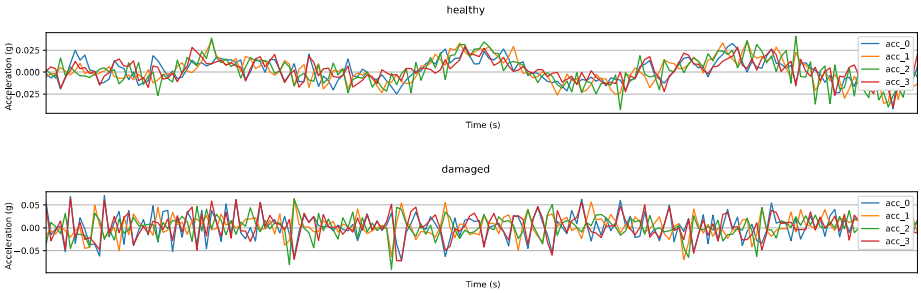


Figure 4 A part of acceleration data of healthy and damaged cases

D. Convolutional Neural Networks

Accelerometer data is inherently sequential and time-series in nature, often presenting challenges for traditional machine learning models that may not effectively capture temporal patterns. To address this issue, researchers have turned to CNNs, which have demonstrated remarkable performance in image and video recognition tasks due to their ability to extract spatial features and capture hierarchical patterns. The use of CNNs for accelerometer data classification offers several significant advantages, making them particularly suitable for this specific domain. One of the primary reasons for utilizing CNNs in accelerometer data classification lies in their capability to automatically learn relevant features from the input data [9]. Accelerometer data contains intricate patterns and features that represent different activities or structural states. CNNs, equipped with convolutional layers, can effectively extract these features without the need for manual feature engineering, saving valuable time and effort in the data preprocessing stage.

Moreover, accelerometer data often exhibits hierarchical characteristics, where low-level patterns combine to form higher-level activities or events. CNNs' hierarchical structure enables them to learn and combine patterns at different levels of abstraction, empowering them to recognize complex activities and states [10]. CNNs inherently possess spatial invariance, enabling them to handle sequential data effectively. In the context of accelerometer data, this is crucial since the patterns indicative of particular activities may occur at different time steps within the sequence. The convolutional layers in CNNs allow the model to identify local patterns regardless of their specific location, making them well-suited for temporal data analysis.

Furthermore, CNNs leverage parameter sharing, significantly reducing the number of learnable parameters compared to traditional fully connected neural networks. In applications involving large-scale accelerometer datasets, this parameter sharing attribute translates to faster training and inference times, leading to more efficient classification processes.

The ability of CNNs to generalize well on unseen data is paramount for accelerometer data classification, where real-world scenarios may vary substantially from the training dataset. CNNs have demonstrated remarkable generalization capabilities due to their ability to learn robust and discriminative features from a diverse range of data samples. This robustness allows them to perform well on new, unseen accelerometer data, making them more reliable in practical applications. Therefore, in the scope of this study 1D-CNN is used to classify the healthy and damaged columns with accelerometer data.

Optimizing hyperparameters in CNNs is a critical aspect of achieving optimal model performance and generalization. These hyperparameters, such as the learning rate, number of layers, filters/kernels, filter size, pooling size, activation functions, batch size, and dropout rate, determine the architecture and behavior of the CNN model [11]. The learning rate governs the step size at which the model updates its weights during training, influencing the speed of convergence and risk of overshooting optimal solutions. The number of layers defines the depth and complexity of the model, impacting its ability to learn complex features. Similarly, the number of filters/kernels in each convolutional layer influences the learned features and the expressiveness of the model. The filter size and pooling size determine the spatial extent and information retained during the downsampling process, respectively. Additionally, the choice of activation functions affects the model's non-linearity and learning capacity.

Through a systematic optimization process, the hyperparameters are fine-tuned to ensure the CNN model's optimal performance. The goal is to find the best combination of hyperparameter values that lead to accurate and reliable classification of healthy and damaged columns based on accelerometer data. By iteratively adjusting these hyperparameters and evaluating the model's performance on validation data, the optimal configuration is determined, enabling the CNN to effectively generalize and provide accurate predictions on new, unseen accelerometer data.

Hyperparameters in Convolutional Neural Networks (CNNs) are parameters that are set before the training process and are not learned from the data. These hyperparameters determine the architecture and behavior of the CNN model and play a crucial role in its performance and generalization ability. Some of the key hyperparameters in CNNs include the learning rate, number of layers, number of filters/kernels, filter size, pooling size, activation functions, batch size, and dropout rate. The learning rate controls the step size at which the model updates its weights during training,

influencing the speed of convergence and risk of overshooting optimal solutions. The number of layers, including convolutional, pooling, and fully connected layers, determines the depth and complexity of the CNN model, affecting its capacity to learn complex features. The number of filters/kernels in each convolutional layer determines the learned features and the model's expressiveness. Filter size defines the spatial extent of the patterns the network can recognize, and pooling size determines the amount of spatial information retained after downsampling. The choice of activation functions, like ReLU or Sigmoid, affects the model's non-linearity and learning capacity.

Batch size specifies the number of samples used in each training iteration, impacting the gradient stability and memory usage. The dropout rate is a regularization technique that controls the probability of deactivating neurons during training to prevent overfitting. To optimize these hyperparameters, various techniques are used: Grid Search involves exhaustively trying all combinations of hyperparameter values from predefined ranges and selecting the best-performing combination. Random Search randomly samples hyperparameter values from predefined ranges, which can be more efficient in finding good settings. Bayesian Optimization uses probabilistic models to predict performance and guides the search process towards promising hyperparameter configurations. Automated Hyperparameter Tuning Libraries, like Keras Tuner and Optuna, provide built-in functionalities to automate hyperparameter optimization. Through iterative tuning and evaluation of the model's performance on a validation set, the best set of hyperparameters can be found, leading to an optimized CNN model that performs well on unseen data and generalizes effectively to new samples.

In this study, random search algorithm is carried out for hyperparameter optimization. In Table 1, the range of various hyperparameters are given. With the help of HyperBand hyperparameter optimization best possible combination of hyperparameters are found.

Table 1 Search space of the hyperparameters

Hyperparameter	**Search Space**
Number of filters	128, 160, 192, 224, 256
Conv1D layers	1, 2, 3, 4, 5, 6
Dropout	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Dense Layers	1,2,3,4
Number of units in Dense Layer	128, 256, 512, 1024, 2048

In the Neural Network model, each Conv1D layer is followed by corresponding MaxPooling and Dropout layers. As a result, the number of Conv1D layers matches the number of MaxPooling and Dropout layers. However, during the hyperparameter optimization process, the hyperparameters and the number of layers can vary. After finding the best hyperparameters using the HyperBand optimization algorithm, the model is trained with these optimized settings.

III. RESULTS

The study presents a comprehensive exploration into the effectiveness of Convolutional Neural Networks (CNNs) for detecting structural damage in fire-exposed reinforced concrete beams using acceleration data. The experimental setup, which involved four specimens and the collection of acceleration data before and after fire tests, provided a robust foundation for analysis. The application of CNN models for damage detection yielded highly accurate outcomes, effectively distinguishing between healthy and damaged beams. This capability holds significant promise for enhancing safety measures and reducing repair costs associated with fire-exposed reinforced concrete structures. Figure 5 offers a layered view of the optimized CNN model, providing valuable insights into its architecture and structure. Understanding these layers and their configurations aids in comprehending how the model processes and analyzes acceleration data for damage detection. Additionally, Figure 6 showcases the confusion matrix for the test set, revealing a flawless classification performance with zero false negatives and negatives, resulting in a 100% accuracy rate. This visualization is crucial for evaluating the model's precision, recall, and overall effectiveness. Overall, the study's findings underscore the potential of CNNs in early detection of structural damage in fire-exposed reinforced concrete beams, offering valuable insights for enhancing safety protocols and mitigating associated risks.

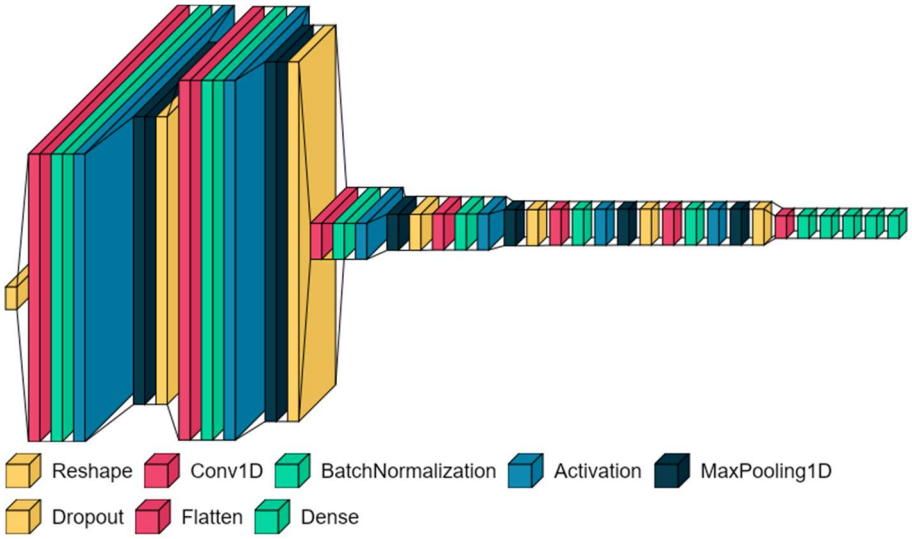


Figure 5 The layered view of the optimized model

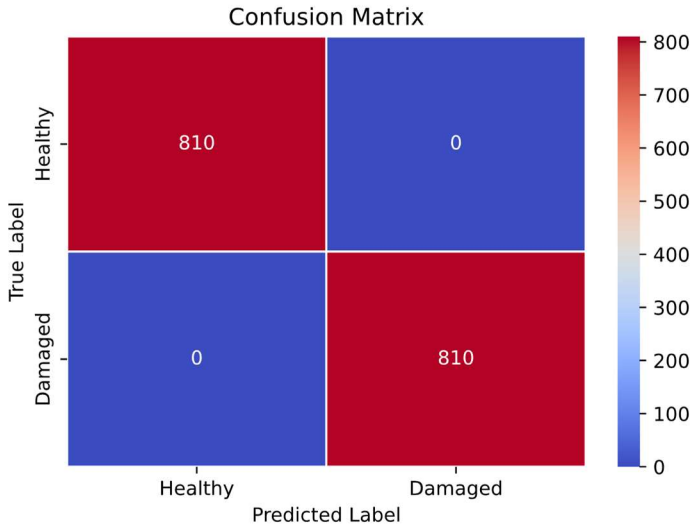


Figure 6 Confusion matrix for the test set

IV. Discussion

The ability of the CNN models to proactively detect structural damage has significant implications for infrastructure management practices. By identifying vulnerabilities caused by fire exposure at an early stage, appropriate actions can be taken to prevent potential catastrophic failures and mitigate safety risks. Moreover, early detection allows for timely repairs and maintenance, minimizing the extent of damage and ensuring the structural integrity of the reinforced concrete beams.

The success of the CNN models can be attributed to their proficiency in learning complex features from acceleration data. By leveraging deep learning techniques and effectively extracting relevant patterns from the input data, the CNN models exhibited robust performance in accurately identifying structural damage.

These findings underscore the potential of deep learning techniques and the value of acceleration data in advancing structural health monitoring practices. The utilization of CNNs in combination with acceleration data showcases a proactive approach to address structural vulnerabilities, leading to safer and more resilient infrastructure management.

In conclusion, the application of Convolutional Neural Networks for early damage detection in fire-exposed reinforced concrete beams using acceleration data yielded highly accurate results. The CNN models demonstrated a remarkable ability to distinguish between healthy and damaged beams, holding great

promise for enhancing safety measures and cost-effectively managing fire-exposed reinforced concrete structures. These findings highlight the effectiveness of deep learning techniques and the importance of utilizing acceleration data to proactively address structural vulnerabilities, ultimately contributing to the safety and longevity of infrastructure system.

V. ÇIKARIM

In summary, the study demonstrates that Convolutional Neural Networks (CNNs) can effectively detect structural damage in fire-exposed reinforced concrete beams using acceleration data. The CNN models achieved high accuracy in distinguishing between healthy and damaged beams, offering potential for improved safety measures and reduced repair costs. Figures 5 and 6 provide valuable insights into the architecture of the optimized CNN model and its flawless classification performance, respectively. These findings emphasize the promise of advanced machine learning techniques in enhancing structural health monitoring and safety protocols for fire-exposed structures.

FUNDING

This work was supported by The Office of Scientific Research Projects, Ege University, Turkey [Grant Number : 26343]

REFERENCES

[1] M. Azimi, A. D. Eslamlou, and G. Pekcan, "Data-Driven Structural Health Monitoring and Damage Detection through Deep Learning: State-of-the-Art Review," *Sensors*, vol. 20, no. 10, Art. no. 10, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20102778.

[2] T. Roy and V. Matsagar, "A probabilistic framework for assessment of reinforced concrete wall panel under cascaded post-blast fire scenario," *J. Build. Eng.*, vol. 45, p. 103506, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103506.

[3] W. Ding, H. Yang, K. Yu, and J. Shu, "Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer," *Autom. Constr.*, vol. 152, p. 104929, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104929.

[4] M. Chamangard, G. Ghodrati Amiri, E. Darvishan, and Z. Rastin, "Transfer Learning for CNN-Based Damage Detection in Civil Structures with Insufficient Data," *Shock Vib.*, vol. 2022, p. e3635116, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/3635116.

[5] O. Abdeljaber, O. Avci, M. S. Kiranyaz, B. Boashash, H. Sodano, and D. J. Inman, "1-D CNNs for structural damage detection: Verification on a structural health monitoring benchmark data," *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 1308–1317, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2017.09.069.

[6] D. Andrushia A, A. N, E. Lubloy, and P. A. G, "Deep learning based thermal crack detection on structural concrete exposed to elevated temperature," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 24, no. 9, pp. 1896–1909, Jul. 2021, doi: 10.1177/1369433220986637.

[7] A. D. Andrushia, N. Anand, T. M. Neebha, M. Z. Naser, and E. Lubloy, "Autonomous detection of concrete damage under fire conditions," *Autom. Constr.*, vol. 140, p. 104364, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104364.

[8] E. Ryu, J. Kang, J. Lee, Y. Shin, and H. Kim, "Automated Detection of Surface Cracks and Numerical Correlation with Thermal-Structural Behaviors of Fire Damaged Concrete Beams," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 14, no. 1, p. 12, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40069-019-0387-3.

[9] M. M. Taye, "Theoretical Understanding of Convolutional Neural Network: Concepts, Architectures, Applications, Future Directions," *Computation*, vol. 11, no. 3, p. 52, Mar. 2023, doi: 10.3390/computation11030052.

[10] G. Diraco, G. Rescio, A. Caroppo, A. Manni, and A. Leone, "Human Action Recognition in Smart Living Services and Applications: Context Awareness, Data Availability, Personalization, and Privacy," *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 6040, Jun. 2023, doi: 10.3390/s23136040.

[11] M. Ramirez-Gonzalez, F. R. Segundo Sevilla, P. Korba, and R. Castellanos-Bustamante, "Convolutional neural nets with hyperparameter optimization and feature importance for power system static security assessment," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 211, p. 108203, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108203.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

3D CAD Programlarında Parametrik Tasarım Metodolojisinin Belirlenmesi

Talha TUFAN[a], Batuhan Özmen[b], Murat Uyar[b]*

[a]Barida Makine R&D Center, Design Department, ORCID: 0009-0007-6438-3855, Bursa/Türkiye.
[b]Barida Makine R&D Center, Design Department ORCID: 0009-0007-6438-3855, Bursa/Türkiye.
[c]Bursa Uludağ University , Department of Electrical and Electronical engineering ORCID: 0000-0001-7243-7939, Bursa/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar: talha.tufan@baridagroup.com.tr**

ÖZET

3D CAD Modelleme, tasarım sürecine sağladığı pozitif katkılardan dolayı küresel endüstride önemini hızla artırmaktadır. CAD yazılımları, ürün geliştirme sürecinin imalat süreci ile birlikte kombine olarak ilerleyebilmesinden dolayı üretim sürecinin hızlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Teknoloji ile gelişen ve eklemeli imalat yöntemlerinin de gelişmesi ile pozitif yönde değişen imalat süreçleri, neredeyse CAD tasarım süresine kadar indirgenmiştir. Bununla birlikte, rekabetin oldukça yoğun olduğu sektörlerde tasarım aşamasına ayrılan sürenin azaltılması hedeflenmektedir. Yoğun rekabet koşullarında avantaj elde etme hedefi, tasarım ürünlerinde modüler yapılar kurma ihtiyacını beraberinde getirmiştir.

Tasarım ekolleri olarak parçadan bütüne, bütünden parçaya, multibody gibi kesin ve net olarak sınırları çizilmemiştir. CAD Modelleme programları, yapısı gereği parametrik çalışmakla birlikte genelde kullanıcıların benimsediği tasarım ekolleri, parametrik tasarım çerçevesinde yürütülememektedir. Parametrik tasarım, geliştirilen prototip modeller üzerinde yapılacak değişiklik ve iyileştirmelerin hızlı ve kolay bir şekilde uyarlanabilmesine imkan tanımaktadır. Parametrik yaklaşım için bir akış şeması belirtmeyen güncel tasarım ekolleri, modüler tasarıma uygun değildir.

Barida Makine firmasının tecrübelerine dayanarak firma bünyesinde yürütülen tasarım süreçleri klasik tasarım ekollerinden devam etmektedir. Fakat mevcut süreçlerde değişken parametreler belirli olmasına rağmen, parametrelerde yapılan değişiklikler veya benzer tasarım işlerinin tekrarlanması tasarım sürecinin baştan başlamasına neden olmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen metot ile gerçekleştirdiğimiz parametrik tasarımlar sonucunda esnek tasarımlar elde edilip zaman kayıpları engellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *3D Modelleme, CAD, Mekanik Tasarım Süreci, Veri Boyutu İndirgeme*

Determining Parametric Design Methodology in 3D CAD Programs

ABSTRACT

3D CAD modeling's importance in the global industry is rapidly increasing due to the positive contributions it makes to the design process. CAD software significantly accelerates the production process by allowing product development to proceed in conjunction with manufacturing. With advancing technology and the development of additive manufacturing methods, manufacturing processes have evolved positively, nearly aligning with CAD design times. However, in sectors with intense competition, there is a goal to reduce the time allocated to the design phase. The objective of gaining an advantage in highly competitive conditions has led to the necessity of establishing modular structures in design products.

Design approaches such as from part to whole, from whole to part, or multibody do not have clearly defined boundaries. Although CAD modeling programs inherently work parametrically, the design approaches commonly adopted by users are not typically conducted within the framework of parametric design.

Parametric design enables quick and easy adaptation of changes and improvements to developed prototype models. Current design approaches that do not specify a flowchart for the parametric approach are not suitable for modular design.

Based on Barida Machinery's experiences, design processes conducted within the company continue to adhere to classical design approaches. However, despite the defined variable parameters in the current processes, changes to parameters or the repetition of similar design tasks lead to restarting the design process. Through the method developed in this study, flexible designs have been achieved, preventing time losses in parametric designs we conducted.

Keywords: *3D CAD design, parametric design, design methodology*

I. GİRİŞ

3D CAD modelleme, birçok endüstriyel sektörde teklif sürecinden devreye alma sürecine kadar tüm aşamalarda kullanılmaktadır. CAD modelleme ile bu süreçlerin tümünde zamandan tasarruf edilmekle beraber olası hataların öngörülmesine olanak tanınmaktadır. Günden güne gelişen ve hızlanan imalat teknolojileri CAD tasarım arzı doğurmuştur. Ancak mevcut yapıda kullanılan tasarım yöntemleri talebi karşılamada güçlük çekmektedir.

Mevcut tasarım süreçlerinde parçadan bütüne, bütünden parçaya, çoklu gövdeli tasarım, tekil gövdeli montajlı yapı gibi bazı bilinen tasarım teknikleri uygulanmaktadır [1]. Bu tasarım metotları mevcut düzende üretim sürecinin darboğazıdır. Bu teknikler kullanılarak yapılan tasarımlarda süreç içerisinde karşılaşılabilen değişiklikler veya öngörülmemiş kısıtlar tasarım sürecinin uzamasına veya tasarımın baştan yapılmasına neden olur [2]. Bilinen geleneksel tasarım yöntemleriyle yönetilen süreç içerisinde karşılaşılabilen amaç ve kısıt değişiklikleri, mükerrer işleri engellemek için yeni bir metot arayışı doğurmuştur.

Bu çalışmada, tekrarlı işlerin önlenmesi adına nihai tasarım ürününde bir değişiklik olmadan, modüler veri üretmek için bir metot önerilmiştir. Önerilen bu metot yardımıyla, tasarım ürününe parametrik yaklaşım ile kontrol edilebilirlik kazandırılmıştır.

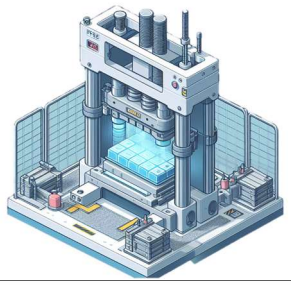
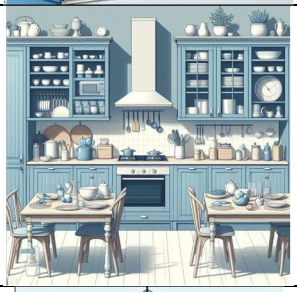
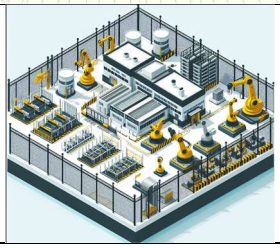
II. MATERYAL METOT

Giriş bölümünde açıklanan imalat teknolojisindeki hızla gelişen teknoloji ve süreçleri daha efektif çözüm arayışlarını teşvik etmektedir. Bu sebeple tasarımın bir sonraki adımı olarak düşünebileceğimiz parametrik tasarım, geleneksel metotlardan farklı bir bakış açısı sunmaktadır.

Parametrik tasarımı geleneksel tasarım metotlarından ayıran bazı temel özellikler vardır. Geleneksel tasarım genellikle belirli bir sonuca ulaşmak için sabit bir tasarım üzerine inşa ederken parametrik tasarım, problemlere daha geniş çerçeveden çözümler getirecek yapıyı kurmaktadır [3]. Kurulan bu yapı tasarımcı tarafından belirlenen amaç doğrultusunda istenen limitlerde birden fazla çözüm sunar. Bu sayede tasarıma kontrol edilebilirlik yeteneği kazandırılmış olur.

CAD tasarımın kullanıldığı birçok makine sektöründe işlevsel olarak tasarımı yapılan makinelerin benzerliğine karşın giriş parametrelerinin değişmesiyle makine tasarımı yeniden yapılmaktadır. Bahse konu makineler örnek değişken parametreleri ile birlikte tabloda listelenmiştir:

Tablo 1. Makine tipleri ve değişken parametreler

Makine Tipi	Örnek Görsel	Değişken Parametreler
Konveyör		Bant hızı, Uzunluk, Genişlik, Bant tipi, Bant malzemesi, Taşınacak ürün bilgileri, Çalışma şartları, Çalışma sıklığı
Press		Tonaj, Pres ölçüleri, Malzeme, Çalışma sıklığı, İşlevi, Adım sayısı, Ürün ölçüleri, Mekanik güç ünitesi
RollForm		Ürün şekli, Top çapları, Sac kalınlığı, Hat uzunluğu, İstasyon sayısı, Ürün çeşitliği, Hat hızı
Raf		Genişlik, Yükseklik, Yük kapasitesi, Raf aralıkları
Mobilya		Genişlik, yükseklik, Fonksiyonellik, Beyaz eşya konumları Malzeme seçimi, Kapak türleri, Aksesuarlar
Robotik Hücre		Kapasite, Robot seçimi, İstasyon boyutları ve sayısı, Enerji gereksinimleri, İşlem alanı, Robot baza ölçüleri

Yedi aşamadan oluşan CAD tasarım süreçleri için hazırlanan parametrik tasarım metodu aşağıda ifade edilmiştir.

A. Amaçların ve Kısıtların belirlenmesi

Amaçların belirlenmesi parametrik tasarımın ilk ve en önemli aşamasıdır. Bu aşamada teknik detaylardan bağımsız olarak tasarımı yapılacak ürün, sistem veya süreç tasarımının istemleri net olarak belirtilmelidir. Bu istemler tasarım ürününün kullanıcıları tarafından oluşturulup mutabakat sağlandıktan sonra diğer aşamalara geçilmelidir. Belirlenen amaçlar nihai ürünün fonksiyonlarını içermeli ve tasarımcıyı yönlendirici olmalıdır.

Bir tasarımın en önemli ikinci aşaması ise kısıtları belirlemektir. Kısıtlar genel çerçevede olmalı, amaçlardan bağımsız olarak tasarımcının sınırlarını çizmelidir. Teknolojik yeterlilik, temel fizik kurallarına uygunluk, gibi genel kısıtlar olsa da proje özelinde yerleşim alanı, çalışma ortam şartları, bütçe, termin süresi, çevrim süresi gibi kısıtlar da olabilir. Parametrik tasarımın ilk adımında kısıtların tümüyle belirlenmesi gerekmektedir. Amaçlar ve kısıtlar süreç boyunca değişmemelidir.

B. Konsept Tasarımın Oluşturulması

Tasarımın bilgisayar ortamında genel hatlarıyla oluşmaya başladığı aşamadır. Kavramsal tasarım olarak da adlandırılabilir. Bu aşamada mühendislik hesaplarına ihtiyaç duyulmaz. Amaçlar doğrultusunda kısıtlar içinde kalarak bir taslak tasarım oluşturulmalıdır. Esas amacı proje yürütücülerine ve müşterilere, hedeflenen tasarımı doğru şekilde aktarıp genel çerçevede mutabık kalınması amaçlanmaktadır. Bu aşamada yapılan tasarımın değişme olasılığı olduğundan mümkün olan en az işçilikle detaylara takılmadan yapılacak işi üç boyutlu ortama aktarabilmeyi sağlayan bir konsept tasarım oluşturulmalıdır.

C. Konsept Tasarımın Nihai Tasarıma Dönüştürülmesi

Konseptin süreç yürütücüleri tarafından onaylandıktan sonra tasarımın detaylanabilmesi için amaçları içeren mühendislik hesaplamalarının yapılması ve standart bileşenlerin öncelikli olarak seçilmesi ile nihai tasarım süreci başlar. Özellikle seçilen bu standart ekipmanların, kısıtların dışına çıkmaması kontrol edilmelidir. Nihai tasarım sürecinde sabit ve hareketli parçaların konumları, limitleri belirlenerek amaca uygun tasarım yapılır. Nihai tasarım oluşturulurken imal usulleri, montaj-demontajda kolaylık, taşıma için gerekli tutucular, iş güvenliği kriterleri, maliyet, ergonomi, bakım kolaylığı gibi bazı teknik ve ticari detaylar göz önünde bulundurulmalıdır. Buraya kadar olan süreç herhangi bir CAD tasarımı için izlenmesi gereken adımlardır[4]. Nihai tasarım süreci boyunca proje ekibi ve müşteriler ile periyodik toplantılar düzenlenerek tasarım sonuca gitmelidir. Bu süreçte konseptin dışına çıkılırsa veya amaç ve kısıtları aşan istekler olursa metodun ilk aşamasına tekrar dönülmelidir.

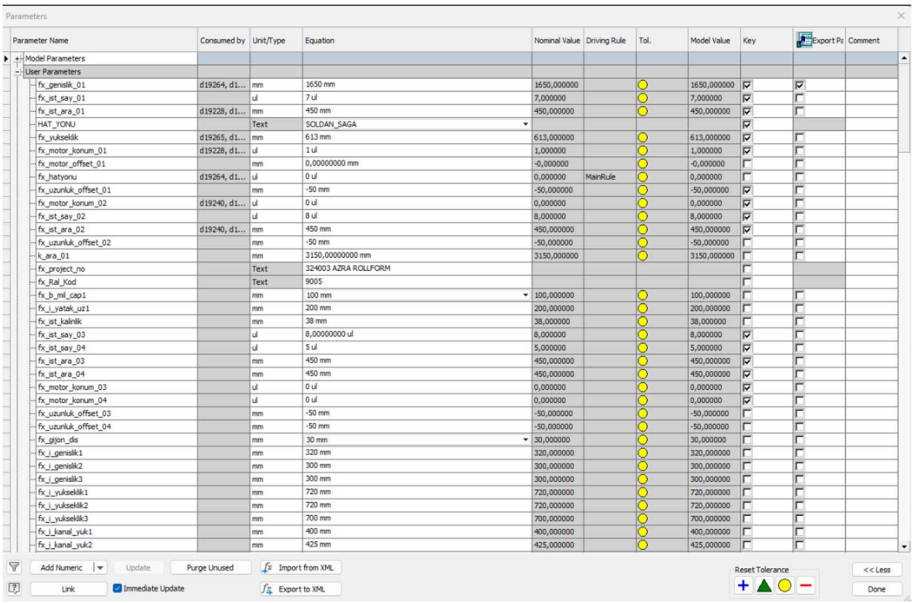
D. Değişken Parametrelerin ve Limitlerin Belirlenmesi

Nihai tasarım proje yürütücüleri tarafından onaylandıktan sonra başlangıçta verilen amaçlara göre sistemi etkileyen bağımlı veya bağımsız tüm değişkenler belirlenmelidir[5]. Bu değişkenler sayısal olarak ifade edilebilen, bilinen yöntemlerle hesaplanabilen değişkenler olmalıdır. Örneğin, bir konveyörün parametrik tasarlanmasında, amaçlar kısmında konveyörün saatteki üretim kapasitesi istendiğinde, bu sistemin değişken parametreleri; motor gücü, redüktör oranı, tambur çapı gibi parametreler olmalıdır. Bu aşamada parametreler belirlenirken, değişebilme ihtimali olan parametrelerin limitlerinin de belirlenmesi gerekir. Örnekteki konveyör, verilen amaçlara yönelik özelleştirilmiş bir tasarım olacaktır. Fakat burada değişebilecek parametrelerin limitleri (Örneğin; saatteki üretim kapasitesi 50/150) öngörülerek belirlenmesiyle özelleştirilmiş tasarımdan modüler tasarıma geçmek için ilk aşama tamamlanmış olacaktır.

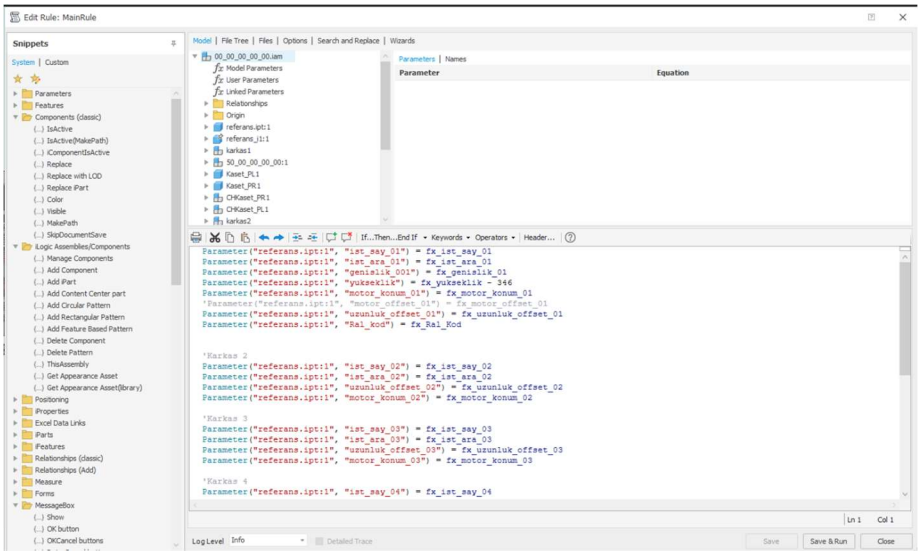
E. Parametreler Arası Matematiksel Bağıntıların Kurulması

Bir önceki aşamada belirlenen parametrelerin birlikte çalışacak ve birbirini etkileyecek parametreler arasındaki bağıntılar bu aşamada belirlenmelidir (Şekil 1 ve 2). Bağıntıların sonucunda yönetilecek parametre sayısı azalacaktır. Kontrol edilecek sonuç parametreleri için iki ana tip kontrol tekniği kullanılır. Bunlardan ilki çoktan seçmeli olup seçim kullanıcıya bırakılmaktadır. Kullanıcının seçimine göre tasarım veya süreç manipüle edilir. Bir diğeri ise, parametrelerin sayısal değerlerini belirli limitler içerisinde kullanıcıya girdirilip girilen parametreleri ihtiva eden fonksiyonların çıktıları ile tasarımı manipüle etmektir (Şekil 3). Her iki kontrol tekniği de parametrik tasarıma geçişte mutlaka kullanılmalıdır. Örneğin;

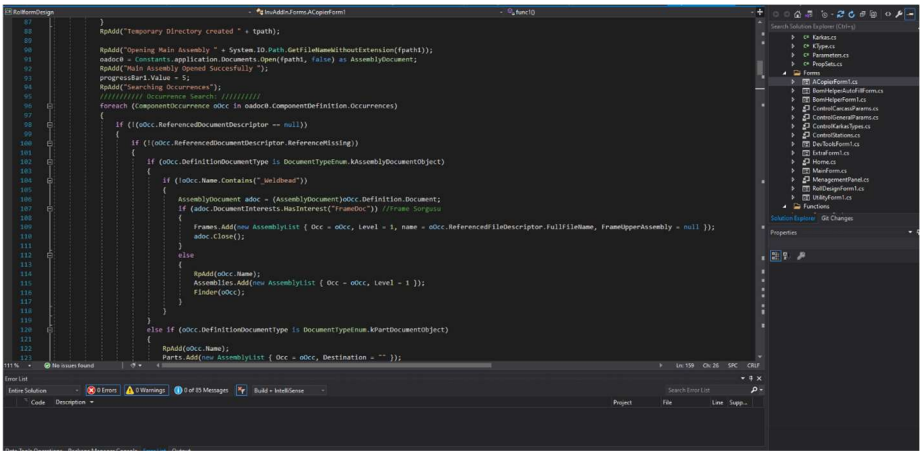
bir rollform hattının operatör pozisyonunun hat akış yönüne göre sağda veya solda olması kullanıcının seçim yapacağı bir parametredir. Ancak hat üzerinde kaç istasyon olacağı, adet olarak kullanıcının giriş yapacağı bir parametredir. Bu iki parametrenin belirlenmesiyle bağımlı olduğu tüm fonksiyon çıktıları ve diğer parametreler ayarlanabilir olmaktadır.



Şekil 1. Parametre tablosu ve bağıntılar



Şekil 2. Bağıntılar ve eşitlikler



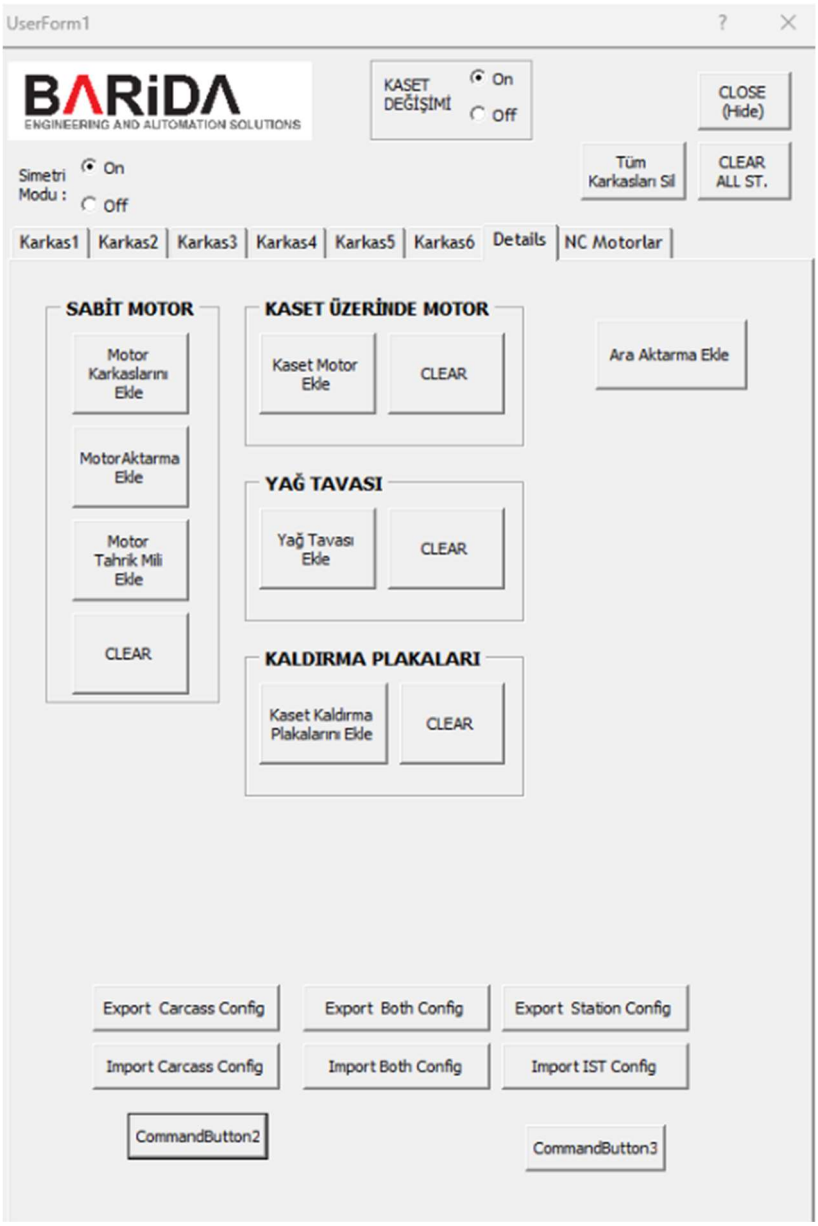
Şekil 3. Bağıntılar ve eşitliklerin algoritma yapısının kurulması

F. Parametrik Tasarım Temellerinde Tasarımın Tekrardan Oluşturulması

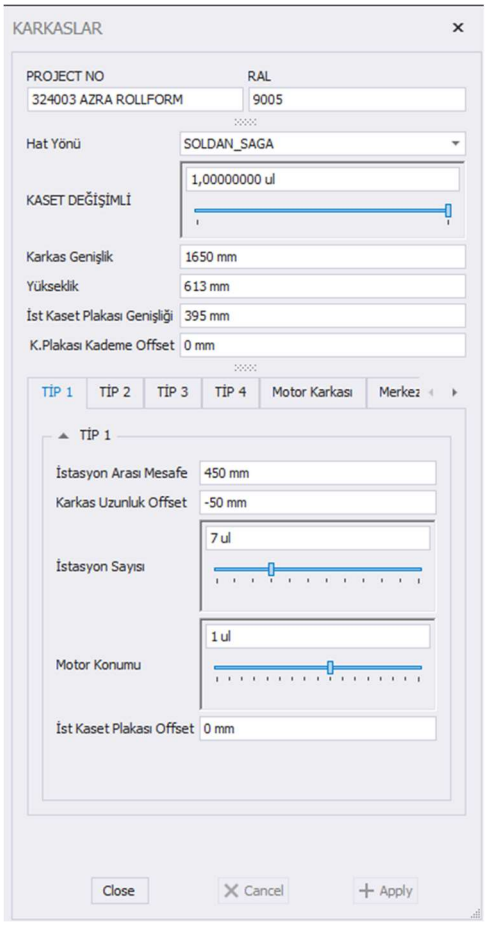
Bir önceki aşamada belirlenen değişken parametreler isimlendirilerek dokümantasyonu ile birlikte nihai tasarım revize edilmelidir. Gerektiğinde parçalar tekrar tasarlanmalıdır. Mevcut nihai tasarım değişken parametreleri uyguladığımızda tekilliğe düşebilir veya parametre değiştirerek tasarımın güncellenemediği durumlarda tasarım çoğaltılarak yeni varyantlar türetilir. Bu varyantlar daha sonraki aşamalarda kullanıcıya çoktan seçmeli olarak sunulmalıdır.

G. Parametreleri Kontrol Etmek İçin İhtiyaç Duyulan Kullanıcı Arayüzünün Tasarlanması

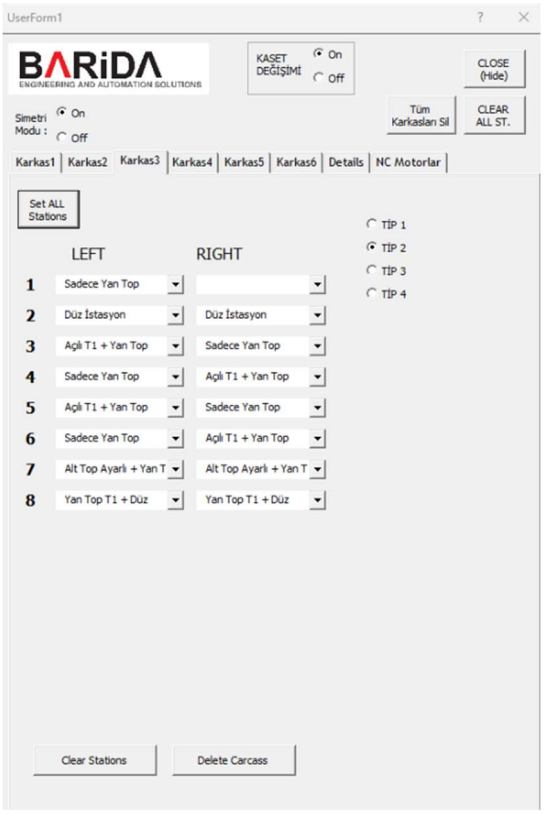
Öncelikle arayüzü tasarımı yapılırken en önemli ölçüt kullanıcı dostu olmasıdır[6]. Parametrelerin anlaşılır olması için gerektiğinde görsellerle desteklenmeli ve açıklamaları net olmalıdır. Kontrol edilecek parametreler sınıflandırılmalı ve birbirinden bağımsız sınıflar farklı panellerde yönetilmelidir. Kullanıcı tasarladığı konfigürasyonu gerektiğinde dışa aktarabilmeli veya önceden hazırlanmış bir konfigürasyon içe aktarılabilmelidir. Tasarlanan kullanıcı arayüzü örnekleri Şekil 4-6'da sunulmuştur.



Şekil.4 Örnek ara yüz tasarımı



Şekil. 5 Örnek ara yüz tasarımı



Şekil. 6 Örnek ara yüz tasarımı

III. SONUÇLAR

Çalışmada belirlenen parametrik tasarım metotları ile hazırlanan bir proje ile elde edilen parametrik tasarım kullanılarak firmaya bazı pozitif katkılar sağlanmıştır. Bu çalışma; projenin kümülatif tasarım süresinden %80 kazanç, hata oranında %90 azalma, maliyette azalma, standartlaştırmanın getirdiği faydalar, oluşturulan parametrik projeler üzerinde yapılacak optimizasyonlar ve Ar-Ge çalışmaları için süre, kalitenin birikimli olarak artma potansiyeli gibi teknik ve ticari faydalar sağlamıştır.

Sonuç olarak bu oluşturulan metot firmada bir projede denenmiş ve yukarda belirtilen faydalar ölçülmüştür. Bu çalışma ile firmaya süreç yönetimi için yeni bir metot kazandırılmıştır.

IV. TARTIŞMA

Parametrik tasarım metodunun uygulanmasıyla oluşabilecek kazanımlar anlatılmıştır. Bu kazanımların kalıcı olması için proje yürütme sistematiğinin değişmesi gerekir. Ancak mevcut düzende yürürlükte olan geleneksel tasarım metotları bulunmaktadır. Mühendislik bilimi ve mühendislik becerileri geleneksel yöntemlerde hesap yapma temeline dayanırken günümüzde hesap makinesi yapmak olarak şekillenmiştir. Burada parametrik tasarım, temelde tekrarlı işlerin önüne geçmek için bir metot olarak planlanmıştır. Fakat bu düzene geçiş sürecinin ilk dönemlerinde faydaları gözle görülür bir şekilde olmasa da süreç tamamlandığında getirmiş olduğu kümülatif faydalar tecrübe birikimi olarak kayda geçecektir.

V. ÇIKARIM

Geliştirilen bu metot sayesinde tekrarlı işlerin önüne geçmenin önemi gün geçtikçe daha iyi anlaşılacaktır. Bu çalışma ile elde edilen metotun tasarım süreçlerinde aktif olarak kullanılması sonucunda kümülatif tasarım süresinden %80 kazanç, hata oranında %90 azalma, maliyette azalma, standartlaştırmanın getirdiği faydalar elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecimiz boyunca liderlikleri ve destekleri için, Barida Makine Yönetim Kurulu Başkanı Sinan Batır'a ve Ar-Ge birimi yöneticimiz Hilal Gökalp'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] A.Lukaszewicz, "Modelling of solid part using multibody techniques in parametric CAD systems." Solid State Phenomena, 147, 924-949, 2009.

[2] Y. Haik, T.M. Shahin, S. Sivaloganathan "*Engineering design process,"* Stamford: Cengage Learning, S, 2011.

[3] V.V.Vega, F.A.Gil, N.A.Borrás, L.D.Dunai "Parametric modeling strategy for automatic product configuration*," IECON 2020 The 46th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society.,* pp. 3102-3108, Oct. 2020.

[4] J. Clarkson, C. Eckert (Eds.). "*Design process improvement: a review of current practice,"* 2010.

[5] N.Cross. "*Engineering design methods: strategies for product design*," John Wiley & Sons, 2023

[6] J. Tidwell, "*Designing interfaces: Patterns for effective interaction design*," O'Reilly Media, Inc, 2010

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Tekstil Klima Santrallerinin Hava Yıkama Hücrelerinde Kullanılan Damla Tutucunun Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi ve Düşük Basınç Kaybına Sahip Damla Tutucu Tasarımı

Hacı İbrahim KARAOKUR[a], Osman AHLATLI[a], Emrah GÖNEN[a]*

[a]Temsan Makina ve Tekstil Sanayi Ticaret Anonim Şirketi, Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Kahramanmaraş/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: ibrahim.karaokur@temsanair.com

ÖZET

Tekstil klima santrallerinin bileşeni olan hava yıkama hücrelerinin boyutlandırılmasında, havanın etkili bir şekilde nemlendirilmesi ve oluşabilecek basınç kayıplarının optimum seviyede tutulması önemlidir. Hava yıkama hücresinin çıkışında konumlanan damla tutucular, yıkanan havadaki fazla suyun tutulmasını sağlamaktadır; ancak bir taraftan da sistem direnci oluşturarak basınç kaybına ve buna bağlı olarak bir miktar enerji tüketimine neden olmaktadır. Klima santrallerinde yaygın olarak kullanılan standart damla tutucu tasarımını, su tutma verimi ve basınç kaybı arasındaki optimal hava hızını belirler. Bu hız limiti, hava yıkama hücresinin küçük ölçekte boyutlandırılmasını engelleyebilir. Literatürde tekstil klima sistemlerinin gerekliliklerine uygun farklı hava hızlarının damla tutucuların su tutma verimliliği üzerindeki etkinliği henüz tam olarak tartışılmamıştır. Bu çalışma, tekstil klima sistemlerindeki standart damla tutuculara göre hız limitini artırmayı ve aynı zamanda su tutma verimliliğini artıracak yeni bir tasarım geliştirmeyi amaçlamaktadır. İstenilen damla tutucu özelliklerine ulaşmak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak, parametrik olarak tanımlanan damla tutucu ölçüleri üzerinden akış sonuçları incelenmiş ve optimum geometrik tasarıma ulaşmak için çalışmalar yürütülmüştür. HAD modeli, gerçek durumu en iyi yansıtan ve literatürde testlerle doğrulanmış bir metoda uygun şekilde kurulmuştur. Çalışma sonucunda, yüksek hava hızında basınç kaybının düşük, su tutma verimliliğinin ise yüksek olduğu aerodinamik bir tasarımın ortaya konmasıyla mevcut hız limitinin %45'ten fazla artırılması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Hava yıkama hücresi, Damla tutucu, HAD, Aerodinamik tasarım.*

Numerical Investigation of Droplet Separator Used in Air Washing Cells of Textile Air Handling Units and Design of Droplet Separator with Low Pressure Loss

ABSTRACT

In the sizing of air washing cells, which are components of textile air handling units, it is important to effectively humidify the air and to keep the pressure losses at an optimum level. Droplet separators located at the outlet of the air washing cell retain the excess water in the washed air; however, they also create system resistance, causing pressure loss and consequently some energy consumption. The standard droplet separators design commonly used in air handling units is determined by the optimal air velocity between water retention efficiency and pressure loss. This speed limit may prevent the air washing cell from being sized on a small scale. The effectiveness of different air velocities suitable for the requirements of textile air conditioning systems on the water retention efficiency of drip traps has not yet been fully discussed in the literature. This study aims to develop a new design that will increase the speed limit and at the same time improve the water retention efficiency compared to standard droplet separators in textile air conditioning systems. In order to achieve the desired droplet separators characteristics, Computational Fluid Dynamics (CFD) method was used to examine the flow results over the parametrically defined drip trap dimensions and studies were carried out to reach the optimum geometric design. The CFD model was established in accordance with a method that best reflects the real situation and has been validated by tests in the literature. As a result of the study, the current speed limit was increased by more than 45% by introducing an aerodynamic design with low pressure loss and high water retention efficiency at high air velocity.

Keywords: *Air wash cell, Droplet separator, CFD, Aerodynamic design.*

I. GİRİŞ

Dünya genelinde su ve yeraltı enerji kaynaklarının giderek azalması, hızla gelişen endüstrinin çevre dostu ürünlere olan talebini artırmıştır. Aynı zamanda, yükselen enerji maliyetleri endüstriyel işletmeleri enerjiyi daha verimli kullanmaya ve tüketimlerini azaltmaya yönelik çabalar içine girmeye zorlamaktadır. Bu bağlamda, enerji verimliliğinin artırılması sadece maliyet tasarrufu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Ülkemizde, imalat sanayi alt sektörleri bazında tekstil endüstrisi, 22 sektör içinde toplam enerji tüketimi açısından üçüncü sırada yer almaktadır [1]. Tekstil endüstrisinde enerji tüketen sistemlerin başında ise iplik üretim işletmelerinde bulunan filtre üniteleri ve klima santralleri gelmektedir. Orta ölçekli bir iplik işletmesinde, filtre üniteleri ve klima santralleri işletmedeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu oluştururken, eksenel fanların enerji tüketimi ise bunun en az %70'ini oluşturmaktadır. Fanların enerji tüketimini belirleyen temel parametre, kullanıldığı sistemin basınç kayıplarıdır. Klima santralinin sistem mimarisini oluşturan statik filtre, hava damperi, hava yıkama hücresi (havuz) gibi sistem elemanlarının hava akış direncinin azaltılması, fanların enerji tüketimini azaltılmasını sağlayacaktır.

Havuz sisteminde, hava akış direncini belirleyen en temel bileşenlerden biri ise seperatörlerdir. Seperatörler (damla tutucu), evaporatif nemlendirmenin gerçekleştiği havuzların çıkış kısmında, yıkanan havanın taşıdığı su damlacıklarını tutarak havuz dışına taşınmasını engellemek amacıyla kullanılır. Ancak bir taraftan da sistemde akış direnci oluşturarak basınç kaybına ve buna bağlı olarak fanlarda enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Damla tutucu tasarım metriklerinde, hava akış hızına bağlı olarak basınç kaybı ve su tutma verimi arasında bir ilişki bulunmaktadır. Literatürde tekstil klimalarının havuzlarında kullanılan damla tutucu tasarımlarının incelenmesi ve tekstil klima santrallerinin tasarım metriklerine göre geliştirilmesine dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, farklı iklimlendirme sistemlerde kullanılan damla tutucuların geliştirilmesi konusunda birçok akademik çalışma mevcuttur. Bu bağlamda, bu makale ile benzer konuyu inceleyen bazı çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Stodůlka ve Vitkovičová çalışmalarında, soğutma kulelerinde kullanılan damla tutuculardaki işlevsel parametreleri elde etmek için buradaki akış simülasyonunu ele almışlardır. Akışı, ANSYS Fluent HAD yazılımını kullanarak simüle etmişlerdir. HAD sonuçlarını doğrulamak ve akış alanları arasında doğrudan karşılaştırma yapmak amacıyla prototip model üzerinde deneysel olarak basınç kayıplarını incelemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında, PIV görselleştirme yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal çalışmada ulaştıkları verileri deneysel yöntemlerle doğrulamışlardır. Modern HAD'in, bu alanda tasarım veya optimizasyona önemli ölçüde yardımcı olabilecek çok hızlı ve etkili bir araç olduğunu ve bu yaklaşımın güvenilirliğini hem akış alanı hem de basınç kaybı açısından kanıtlamışlardır [2].

Banitabaei ve diğerleri, dalga plakalı damla tutucudaki basınç düşüşünü hem hava hızı hem de plaka aralığını değiştirerek incelemişlerdir. Ölçülen basınç kayıplarını, basınç düşümü formüllerinin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Plaka aralığının 11,5 mm'den 9,5 mm'ye düşürülmesinin basınç kaybının azalmasına yol açtığını göstermişlerdir. Ancak aralığın daha da azalması basınç kaybının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Boyut analizi temelinde aralık için boyutsuz bir değişken tanımlanmış ve bu değişken için 0,24 değerinin mevcut deney düzeneğiyle incelenen tüm durumlar için minimum basınç katsayısını verdiği gösterilmiştir [3].

Chan ve Golay, sayısal yöntemler ve deneysel teknikler kullanarak standart evaporatif soğutma kulesindeki damla tutucuların performansını analiz etmişlerdir. Sayısal yöntem olarak bir damla tutucu geometrisindeki iki boyutlu akış alanını ve basınç kaybını hesaplamak için DRIFT yazılımının alt programı olan SOLA yazılımını kullanmışlardır. Sonrasında DRIFT yazılımında dördüncü dereceden Runge-Kutta sayısal yöntemiyle belirli bir boyuttaki damlacıklar için yörünge hesaplamaları gerçekleştirerek damla tutucudaki toplama verimliliğini elde etmişlerdir. Deneysel teknikte ise, damla tutucunun hem girişinde hem de çıkışında damlacık boyutu spektrumunun ölçümü için lazer ışığı saçılım tekniklerinden yararlanmışlardır. Deneysel teknikte ölçülen bu spektrumlardan damlacık boyutunun bir fonksiyonu olarak damla tutma verimliliğini çıkarmışlardır. Çalışmalarında üç farklı damla tutucuyu karşılaştırmışlardır. Damla tutucu geometrisi karmaşıklaştıkça ve tutucu içerisindeki akış hızı arttıkça hem damla tutma verimliliğinin hem de basınç kaybının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca sayısal yöntemlerle hesaplanan parametrelerin deneysel tekniklerle ölçülen verilerle uyum içinde olduğunu kanıtlamışlardır [4].

Galletti ve diğerleri, ilk aşamada her ikisi de drenaj kanallarıyla donatılmış iki adet dalga plakalı damla tutucuyu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle incelemişlerdir. İkinci aşamada ise modelleri, damla tutma verimlilikleri ve basınç düşüşlerine ilişkin kapsamlı deneysel verilerle karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda türbülans modelinin damlacık hareketinin belirlenmesinde temel rol oynadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, genellikle ticari HAD yazılımlarında bulunan girdap etkileşim modeli gibi klasik dağılım modelleri bu çözümleme için uygun olmadığına değinerek, damla tutma verimliliğinin hesaplanmasında %100 den daha büyük hata olabileceğini savunmuşlardır. Bu nedenle, mevcut Lagrange algoritmasını kullanarak dağılım modelini alternatif modellerle değiştirmek amacıyla

basit bir prosedür önermişlerdir. Çeşitli girdap etkileşim modeline sahip tahminlerin, damla tutma verimliliğine ilişkin deneysel verilerle yakından eşleştiği gözlemlenmiştir. Akış alanının ve damlacık hareketinin daha iyi tanımlanmasıyla sonuçlanan düşük Re için türbülans modellerinin analizini de gerçekleştirmişlerdir [5].

James ve diğerleri, yaptıkları çalışmada damla tutucu geçişlerindeki drenaj kanallarının etkisini değerlendirmek amacıyla dalga plakalı damla tutucunun performansını sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Drenaj kanallarının birincil hava akışı ve sıvı damlacık dağılımının gelişimi üzerindeki etkisini, çeşitli akış hızları, dalga plakası aralığı, kanal boyutları ve giriş damlacık boyutu dağılımları değişken parametreleri ile hesaplamışlardır. Drenaj kanallarının damlacık toplama verimliliği üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Ayrıca, damla tutucuların tasarım parametrelerini belirlemek için akış özelliklerini tahmin etmişlerdir [6].

Narimani ve Shahhoseini, çalışmalarında sıvı ve gazı ayırmak için en etkili komponentin kanatlı damla tutucu olduğunu ve bu ekipmandaki sıvı ayırma verimliliğinin büyük ölçüde gaz hızına ve geometrik parametrelere bağlı olduğunu savunmuşlardır. Bu sebeple, farklı kanat geometrilerinin damla tutucu verimliliği üzerindeki etkilerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini (HAD) kullanarak araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarında Eulerian-Lagrange yaklaşımı uygulamışlardır. Kancalı ve basit kanatların performanslarını simülasyon ortamında karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, ayırma verimliliği ve kanat geometrisi arasında makul bir bağımlılık olduğunu göstermişlerdir [7].

Lucas ve diğerleri, soğutma kulelerinde insan sağlına zararlı su damlacıkların tutularak su kaybını en aza indirmek amacıyla kullanılan damla tutucuları incelemişlerdir. Soğutma kulelerinde kullanılan damla tutucuların sistemde oluşturduğu basınç kayıpları soğutma kulesinin termal performansını etkilediğini öngörmüşlerdir. İnceledikleri bibliyografya da bu hususa dayalı bir çalışma bulamamışlardır. Yaptıkları çalışmada, geniş bir hava ve su kütle akış hızları aralığı için farklı damla tutucularla donatılmış, cebri çekişli, karşı akışlı bir ıslak soğutma kulesinin termal performansını incelemeyi amaçlamışlardır. Soğutma kulesinin termal performansını tanımlayan kule karakteristiğinin korelasyonlarını elde etmek için deney düzeneği kullanmışlardır. Kule karakteristiğinin deneysel hesaplanmasıyla, damla tutucunun fiziksel konfigürasyonunun, aynı su/hava kütle akış oranı için soğutma kulesinin termal performansını etkilediğini göstermişlerdir. Bu sonucu, damla tutucuların ıslanmasının ısı ve kütle transfer değişimine katkıda bulunmaktadır şeklinde açıklamışlardır [8].

Ruiz ve diğerleri, çalışmalarında damla tutucu tasarımı ve seçiminde kullanılabilecek güvenilir bilgi sağlamak amacıyla altı ticari damla tutucuyu (kanatlı, tel örgülü ve petek tipi) basınç düşüşü ve toplama verimliliği açısından karakterize etmişlerdir. Damla tutucuların basınç düşüşü ve toplama verimliliği karakterizasyonuyla ilgili elli üç deney yapmışlardır. Aynı tip damla tutucular için basınç düşüşü ne kadar yüksek olursa verimliliğin o kadar artacağını tespit etmişlerdir. Tipolojiler açısından tel örgülü ayırıcıların hem basınç düşüşü hem de toplama verimliliği açısından diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamışlardır. Ayrıca, test edilen ayırıcılar için basınç düşüşü katsayısı ve toplama verimliliği için boyutsuz korelasyonlar geliştirmişler ve bu korelasyonlar da deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Samla tutucu seçiminde kullanılan boyutsuz parametrelere ve güç tüketiminin deneysel verilerine dayanarak bir seçim kriteri önermişlerdir. Damla tutucuların çıkışındaki toplama verimliliği ve damlacık dağılım özelliklerinin bir limit dahilinde kule fanlarının tükettiği gücü belirlediği sonucuna ulaşmışlardır [9].

Yu ve diğerleri, soğutma kulesinin bir bileşeni olan dalga plakalı damla tutucunun tüm sistem performansını etkilediğini ve sıvı damlacıklarının toplanmasının ekstra basınç kaybıyla gerçekleştirdiğini savunmuşlardır. Damla tutma verimliliğini artırmak ve aynı anda basınç kaybını azaltmak için damla tutucu yapılarını güçlendiren kavisli dirsekleri ve drenaj kancalarını önermişlerdir. Hesaplamalı sonuçların kavisli büküm ve kancalar arasındaki etkileşimin damla tutucunun genel performansını artırdığını göstermişlerdir. Ayrıca, çalıştıkları parametrelerin performans üzerindeki iyileştirme etkisini kanıtlamışlardır. Özellikle Euler sayısı ve damla tutma verimliliği, kavisli bükülme yarıçapı ve kanca uzunluğunun fonksiyonları olarak ilişkilendirmişlerdir. Soğutma kulesi üzerinde yaptıkları deneyde, damla tutucunun genel termal kapasiteyi azalttığını tespit etmişlerdir [10].

Venkatesan ve diğerleri, çalışmalarında halihazırda benimsenen hesaplamalı metodolojiyi doğrulamak amacıyla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemini kullanarak kanatlı damla tutucuların sayısal araştırmalarını ele almışlardır. Sayısal çalışmada, literatürde tanımlanan ve üzerinde deneysel verilerin bulunduğu bir kanatlı damla tutucu seçmişler ve nominal akış hızında su damlacıkları enjekte etmişlerdir. Ayrıca, parçalanma ve/veya birleşme seçeneğinin bir kombinasyonu ile su damlacığı enjeksiyonunu belirlemek için Rosin-Rammler boyut dağılımına sahip ayrık faz modelleme yaklaşımı seçilmiş ve literatürde önerilen birkaç türbülans modelinin uygunluğunu test etmişlerdir. Çözücü içindeki çeşitli seçenekleri değiştirerek, analiz için uygun bir çözücü ayarı kombinasyonu önermek için sayısal çalışmaları yürütmüşlerdir. Sonuç olarak, Wave modelinin, çözücüde mevcut olan diğer birkaç damlacık parçalanma modeli arasında en iyi seçenek olduğunu tespit etmişlerdir. Çözümlemeye Saffman kaldırma kuvvetinin

dahil edilmesinin sonuçları fazla etkilemediği görmüşlerdir. Spalart-Almaras modeli veya Realizable k-ε modeli, kavisli kanatlı damla tutuculardaki ayırma verimliliğinin sayısal tahmini için uygun bir türbülans modeli olduğunu tespit etmişlerdir [11].

Zamora ve Kaiser, yaptıkları çalışmada, benzer morfolojiye sahip, mekanik soğutma kulelerinde yaygın olarak kullanılan dört tip dalga plakalı damla tutucu performansını karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmuşlardır. Kabaca Reynolds sayısı ve eylemsizlik parametresi sırasıyla 650≤Re≤8500 ve 0,05≤Pi≤2,5 aralığında olmak üzere damlacık toplama verimliliği ve basınç düşüşü katsayısını 1≤Ue≤5 m/s giriş hızı ve 2≤Dp≤50 μm damlacık çapı değerleri için sayısal olarak hesaplamışlardır. Sayısal model, yatay dalga plakalı damla tutucular, ek konfigürasyonları da dahil olmak üzere, literatürden aldıkları sayısal ve deneysel sonuçlarla kıyaslayarak doğrulamışlardır. Damlacıkların türbülans dağılımını dikkate almanın etkilerinin yanı sıra eylemsizlik parametresinin etkisi ve ayırma kanalının en boy oranını da incelemişlerdir. En iyi sonuç damlacıkların türbülanslı dağılımı da dahil olmak üzere 0,2 – 0,5 aralığındaki y+ boyutsuz ölçekli mesafe değerleri için SST k-w türbülans modelinde elde etmişlerdir. Çalışmada tanıtılan atalet parametresi ve uzaklaştırma geometrik parametresinin bir fonksiyonu olarak toplama verimliliği için bir korelasyon önerilmişlerdir. Son olarak, her bir damla tutucu türü için temel bir güç fonksiyonuna dayalı olarak genel verimliliğin belirlenmesine odaklanan bir prosedür geliştirmişlerdir [12].

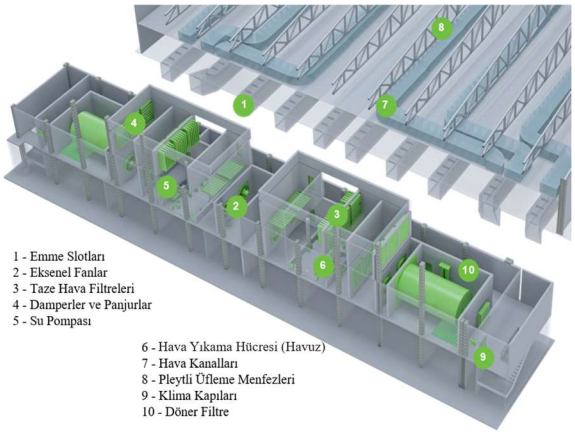
Tekstil klima santrallerinin mevcut tasarım kriterlerine göre havuzlarda olması gereken hava hızı 2,7 m/s olarak belirlenmektedir. Havuzlar bu kısıt doğrultusunda klima hava kapasitesine göre boyutlandırılmaktadır. Klimanın sistem mimarisinin küçük ölçekli olması gerektiği durumda hem bu isterin karşılanması hem de klima kurulum maliyetlerinin azaltılması için havuzdaki hava hızının artırılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise damla tutuculardaki basınç kaybını artırarak gereğinden fazla enerji tüketiminin artmasına ve su tutma verimliliğinin azaltmasına neden olur. Bu çalışma ile başta tekstil klima sistemlerindeki standart damla tutucular olmak üzere bu hız limitini artırmayı ve aynı zamanda su tutma verimliliğini koruyacak yeni bir tasarım geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma Kahramanmaraş'ta tekstil işletmelerine yönelik endüstriyel klimaların projelendirilmesi ve üretimi alanında faaliyet gösteren Temsan Makina ve Tekstil San. Tic. A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, tekstil klima santrallerinin havuzlarında mevcut durumda kullanılan damla tutucuların 2 m/s ile 5 m/s akış hızı aralığında hava akış direnci ve basınç kaybı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ardından damla tutucunun plakaları arasındaki mesafe değişiminin basınç kaybına olan etkisi incelenmiştir. İki boyutlu akış analizleri üzerinden yapılan bu incelenmeler "ANSYS Fluent 2021.2" yazılımında gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, bu çalışmanın gereksinimlerini karşılayacak olan yeni bir damla tutucu separatörün iki boyutlu geometrik tasarımı "AutoCAD 2022" yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, sonrasında minimum basınç kaybını öncelikli kılarak plakalar arası optimum mesafenin belirlenmesi için parametrik HAD analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

A. Tekstil Klima Santrali

Tekstil klima santralinde, bir statik filtre elemanı sonrasında konumlanan aspiratör fanları tarafından emilen işletme ortam havası, işletmenin ihtiyacına göre sıcaklığının ayarlanması sonrasında nemlendirme amacıyla havuza yönlendirilir. Havaya ihtiyaca göre nem yüklemesi yapıldıktan sonra, havuz sonrasında bulunan vantilatör fanları aracılığıyla havuzdan emilen hava tekrar işletme ortamına uygun nem ve sıcaklıkta gönderilir. Bunun sonucunda, filtrelenip iklimlendirilen havanın bir çevrimi tamamlanmış olur. Tekstil klima santralinin sistem mimarisini gösteren üç boyutlu görsel Şekil 1'de verilmiştir.

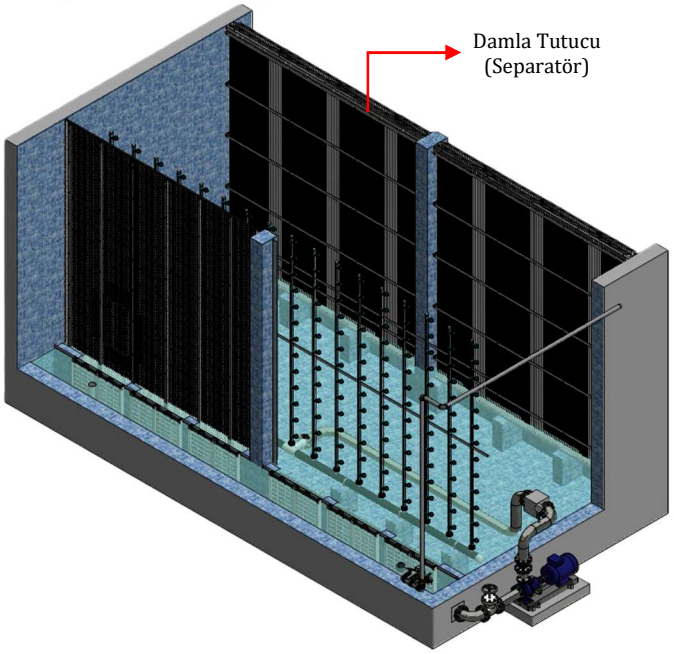


Şekil 1. Tekstil klima santrali

Tekstil klima santrallerinde yüksek kapasite ihtiyacından dolayı ana sistemi oluşturan alt sistemler geniş hacimli olarak kurgulanmaktadır. Alt sistemlerin küçük boyutlarda kurgulanması ihtiyacı durumunda hava akış hızı artmakta ve bunun sonucunda basınç kayıplarını da artırmaktadır. Bu durum ise sistemde kullanılan sirkülasyon fanlarının enerji tüketimlerini arzu edilen seviyenin üzerine çıkmasına neden olur. Boyutların küçültülmesi için yükselen hava akış hızına karşılık alt sistem elemanlarında meydana gelen basınç düşümlerini azaltılması gerekmektedir.

B. Hava Yıkama Hücresi (Havuz)

Tekstil klimalarında havuzlar, şartlandırılacak havanın yıkanarak nemlendirilmesi işlevi için kullanılmaktadır. Havuzdaki evaporatif nemlendirme işlemi, bir pompa aracılığıyla fıskiyelere gönderilen suyun, fıskiyelerde pulverize edilerek sis haline getirilmesi prensibiyle gerçekleşir. Bu noktada, havanın yüksek basınçta pulverize edilmiş su damlacıkları içinden geçirilmesiyle havanın yıkanması sağlanır ve bu süreç sonucunda havaya su yüklenir. Bu işlemin ardından, havuz çıkışındaki damla tutucular, hava akımıyla birlikte sürüklenen su damlacıklarını havuz dışına taşınmasını engeller. Diğer taraftan, damla tutucular vasıtasıyla tutulan suyun tekrar havuz içerisine aktarılmasıyla suyun geri dönüşümü sağlanarak, gerekli su tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunulur. Havuz ve havuzu oluşturan alt sistem elemanlarının bulunduğu üç boyutlu görsel Şekil 2'de verilmiştir.



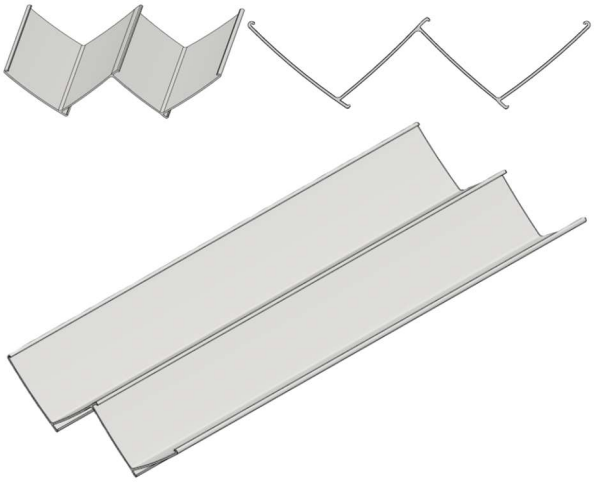
Şekil 2. Tekstil klima santrali hava yıkama hücresi (Havuz)

Mevcut klima havuzlarında hava akış hızı 2,7 m/s olarak ayarlanmaktadır. Havuzun kesit alanı da bu hız değeri dikkate alınarak belirlenmektedir. Havuz kesit alanının düşürülmek istenmesi durumunda ise aynı

hava debisinin daha düşük bir kesitten geçmesi, hava akış hızı artacağından dolayı sistemde meydana gelen basınç kayıpları artmasına neden olur.

C. Damla Tutucu

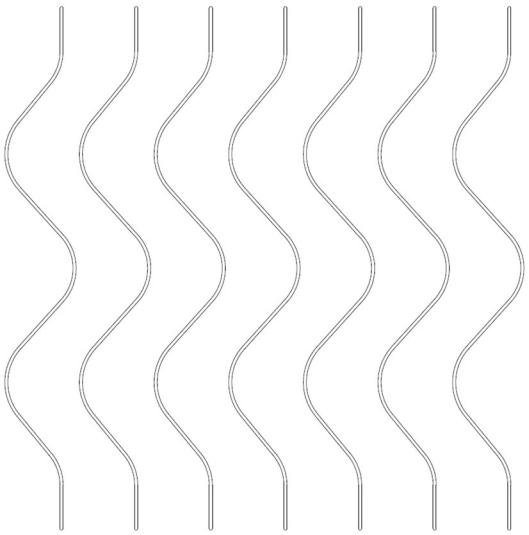
Tekstil klimalarının havuzlarında mevcutta kullanılan damla tutucular, "W" geometrik formunda, 210 mm genişliğinde olup, plastik esaslı malzemeden imal edilmektedir. "W" formunun köşe hatlarında akış direncini artırıp, havanın taşıdığı su damlacıklarının tutmaya yaran düz tip çentikler bulunmaktadır. Klima havuzlarının çıkışında bulunan damla tutucular, birbirine paralel ve yere dik olacak şekilde aralarında 33,2 mm boşluk bırakılarak montajı yapılmaktadır. Mevcutta kullanılan damla tutucunun üç boyutlu görseli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Mevcut durumda kullanılan damla tutucu

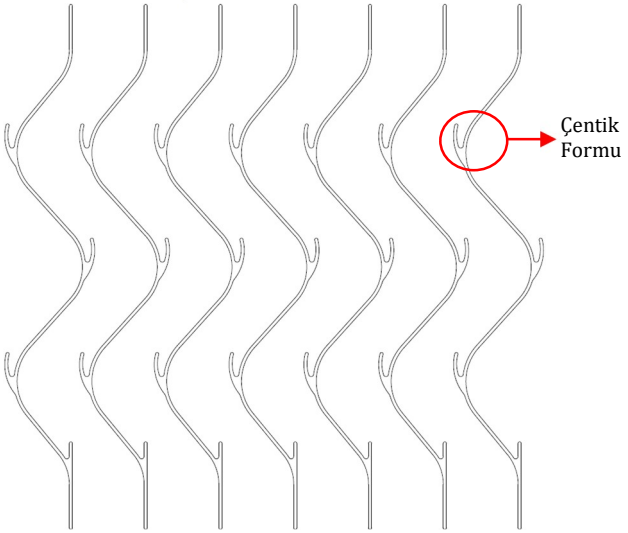
D. Damla Tutucu Tasarımı

Çalışmada 2D akış analizleri gerçekleştirileceğinden dolayı, geometrik form tasarımları "AutoCAD 2022" yazılımında gerçekleştirilmiştir. Damla tutucu geometrik tasarımında birbiriyle bağlantılı üç ana unsur büyük önem arz etmektedir. Bunlar, yakalanan su damlacıkları açısından maksimum verimlilik, minimum basınç kaybı ve minimum miktarda kullanılan malzemedir. Bu üç unsur de birbirine karşıttır, dolayısıyla aralarında uygun bir dengenin yakalanması gerekemektedir [6]. Tasarım ve ardışık optimizasyonun ilk aşamasında damla tutucu plakalar arasındaki akışa odaklanılmıştır. Çünkü damla tutucular arasında bırakılan boşluğun yeterli kütle akışı için gerekli alana sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, yeni tasarımın ana geometrik formunun belirlenmesinin ardından damla tutucular arası boşluk ölçüsünün belirlenmesi amacıyla parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yeni damla tutucunun ana geometrik formu Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yeni tasarlanan damla tutucunun ana geometrik formu

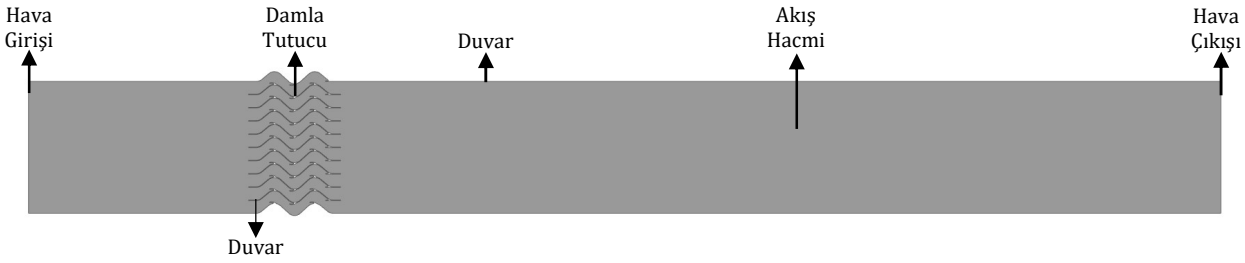
Damla tutucu tasarımında en önemli faktörlerden birisi de yüksek atalet kuvvetleri elde etmek için damla tutucu arasındaki kanalda maksimum hızlara ve eğriliklere ulaşmaktır. Öte yandan basınç kaybını düşük tutmak için büyük akış ayrımından kaçınmak gerekmektedir. Kanal içerisinde hava hızını ve damla tutma verimliliğini artırmak amacıyla çentik yapılarının kullanılması önemlidir. Bu yapılar kullanıldığında basınç artışı meydana geleceği için damla tutma verimliliğini olumlu etkilemektedir [10]. Çentiklerde meydana gelecek olan basınç kayıplarını en aza indirgemek için bu yapılarının aerodinamik tasarımına dikkat edilmesi kritik bir husustur. Yapılan çalışmada damla tutucunun üzerinde gerçekleşen akış sayısal yöntemlerle incelenerek, optimum geometrik forma sahip çentik yapısı belirlenmiştir. Çentik yapılı damla tutucunun geometrik formu şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yeni tasarlanan çentik yapısına sahip damla tutucunun geometrik formu

E. Sayısal Modelleme

Sayısal çalışma kapsamında, "ANSYS Fluent 2021.2" yazılımı kullanılarak, mevcutta kullanılan damla tutucu ve geometrik tasarımları yapılan yeni damla tutucunun yüzeyinde meydana gelen akışın karakteristiği, gerçek çalışma koşullarına göre tanımlanan hacim sınırları içerisinde incelenmiştir. AutoCAD 2022 programında tasarlanan yeni damla tutucu ANSYS yazılımının SpaceClaim modülüne aktarılarak iki boyutlu akış hacmi oluşturulmuş ve sınır şartı isimlendirmeleri yapılmıştır. Oluşturulan bu modelin akış hacminde, akışkanın giriş yaptığı bölgeye "hava girişi", çıkış yaptığı bölgeye "hava çıkışı", sistemi oluşturan cidarlar ise "duvar" olarak isimlendirilmiş olup, simülasyon modelinde sırasıyla "velocity inlet", "pressure outlet" ve "wall" sınır şartları tanımlanmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan modelin 2D görünüşü Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Akış hacminin 2D model görünüşü (Yeni tasarım)

Literatürde benzer dış akış analizlerinde k-ε türbülans modeliyle daha iyi sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Bu nedenle analizlerde k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışmamızın simülasyon modelinde tanımlanan sınır değerleri ve akışkan özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sınır şartları, akış ve akışkan özellikleri

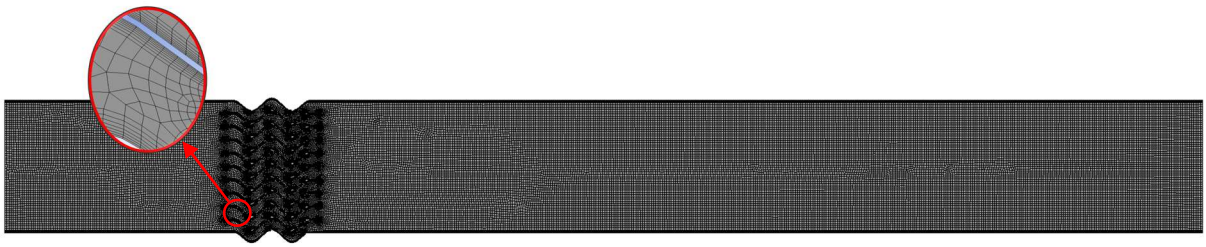
Parametre	**Değer**
Çözüm Tipi	2D
Çözücü Türü	Basınç ağırlıklı
Akış Türü	Zaman bağımsız
Akışkan Türü	Hava
Akışkan Yoğunluğu	1,225 kg/m^3
Türbülans Modeli	Standart wall function, k-ε
Hava Girişi (velocity inlet)	2,7 m/s
Hava Çıkışı (pressure outlet)	0 Pa

Ağ yapısının kalitesi sayısal çözümlemenin kararlılığı ve doğruluğu üzerinde önemli rol oynamaktadır. Ağ kalitesinin en önemli göstergeleri ortogonal kalite veya çarpıklık değeridir. Ortogonal kalite, hücrenin ağırlık merkezinden her bir yüzeyine karşılık gelen yüzey alanı vektörüyle birlikte hücrenin ağırlık merkezinden bitişik hücrelerin ağırlık merkezlerine olan vektörler kullanılarak hesaplanır. En kötü hücreler 0'a, en iyi hücreler ise 1'e daha yakın bir ortogonal kaliteye sahiptir. Tüm hücreler için ortogonal kalite 0,01'den fazla olmalı ve ortalama kalite ise bu değerden daha yüksek olmalıdır. Çarpıklık, herhangi bir hücrenin geometrisiyle eşdeğer hacme sahip bir başka hücrenin geometrisi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Çarpık (çok eğimli) hücreler çözümün doğruluğunu azaltıp, istikrarsızlaştırabilir. Genel kural, çoğu akışta üçgen veya dörtgen ağ yapıları için maksimum çarpıklığın 0,95'in altında tutulması gerektiği ve ortalama çarpıklığın ise 0,95'ten daha düşük olması gerektiğidir [13]. Çalışmada kullanılan sayısal modellerin ağ yapısına ait fiziksel değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısı kalite değerleri

	Mevcut Tasarım	**Yeni Tasarım**
Eleman boyutu	5 mm	10 mm
Eleman sayısı	121.872	101.929
Min. Ortogonal kalite	0,21	0,19
Maks. Çarpıklık değeri	0,79	0,81

2D Modellerde üç yüzlü ve dört yüzlü ağ tiplerinin kombinasyonu kullanılmış olup, yeni tasarıma ait ağ yapısının görseli Şekil 5'te paylaşılmıştır.



Şekil 5. Sayısal modelin ağ yapısı

E.1. Navier-Stokes denklemleri

Akışkanlar mekaniği, akışkanın fiziksel özelliklerini öğrenmeye yardımcı olur. Daha sonra matematiksel denklemleri kullanarak belirli fiziksel özellikleri açıklar. Bu denklemler Navier-Stokes denklemidir ve bu denklemleri yöneten Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) denklemleridir. Navier-Stokes denklemi akışkanlar mekaniğinde, sıkıştırılamaz akışkanların akışını tanımlayan kısmi bir diferansiyel denklemdir. Denklem, sıkıştırılamaz ve sürtünmesiz sıvıların akışını tanımlamak için Euler tarafından geliştirilen bir denklem genellemesidir. Claude-Louis Navier, viskoz akışkanların daha gerçekçi ve çok daha zor problemi için viskozite elemanını ortaya koymuştur. Daha sonra fizikçi ve matematikçi George Gabriel Stokes bu çalışma üzerine, sadece iki boyutlu basit akışlar için tam çözümler elde etmiştir. Hız arttıkça üç boyutlu sıvı akışlarında ortaya çıkan karmaşık girdap ve türbülansın, tahmin edilen sayısal analiz yöntemi dışında herhangi bir yöntemle çözülemediği kanıtlanmıştır [14].

Modern gösterimdeki Navier-Stokes denklemi, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+F \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{u'_i u'_j}\right]+F \quad (3)$$

E.2. Türbülans modeli

Kanal içerisindeki ve ortamdaki hava akımının modellenmesindeki en zorlu taraf akış rejiminin türbülanslı olmasıdır. Türbülanslı akış rejimleri, günümüzde birkaç farklı mühendislik yöntemi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Türbülans modeli yaklaşımları değerlendirildiğinde çözüm ağ geometrisi, yoğunluk ihtiyaçları ve model cidarlarına yakın sınır tabakalardaki y+ değerlerinin bulunması gereken aralık değerleri farklılık göstermektedir. Bu yaklaşımların yakınsama ve çözüm başarısı kullanıldıkları akış rejiminin türbülans miktarı ve yapısına göre önemli değişiklikler göstermektedir [15].

Çalışma kapsamında, dış akış ve akışın yönlendirilmesi konularında yapılan akış analizleriyle ilgili birçok çalışma incelenmiş ve bu tür çalışmalarda standart wall function, k-ε türbülans modelinin daha doğru sonuç verdiği ve genellikle bu türbülans modelinin tercih edildiği görülmüştür. Bu sebeple yapılan çalışmalarda standart k-ε türbülans modeli, standard wall function (standart duvar fonksiyonları) kullanılmıştır. Bu türbülans türbülans modeli için genellikle 30 ila 200 arasında bir y+ değeri önerilir. Damla tutucu gibi ince ve zor geometrilerde yüzeydeki sınır tabakanın yeterli değerde olması, çözüm sonuçlarının doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Çalışma kapsamındaki modellerin ağ yapılarında çözümleme hassasiyetini arttırmak amacıyla 10 katmandan oluşacak şekilde sınır tabaka sınır tabaka yapısı oluşturulmuştur. Buradaki modellerin y+ değerleri 0,71 ila 1,58 arasında değişmektedir. Sınır tabakadaki mesh yapısı Şekil 5'de görülebilir.

E.2.1. Standart k-ε türbülans modeli

İki denklemli k-ε türbülans modeli ilk olarak Launder ve Spalding (1974) tarafından geliştirilmiştir. Bu model, bir dizi mühendislik akışı için en yaygın kullanılan türbülans modelidir ve genellikle standart k-ε modeli tercih edilmektedir. Standart k-ε modeli türbülanslı sıkıştırılamaz akışlar için kinetik enerjisi k ve yayılma hızı ε denklem 4 ve denklem 5'ten elde edilmektedir [13].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

G_k ortalama hız gradyanları ve G_b kaldırma kuvvetleri nedeniyle türbülanslı kinetik enerjinin oluşumunu temsil etmektedir [16]. C_μ, C_1, $C_{2\varepsilon}$ deneysel olarak belirlenmiş aşağıdaki değerlere sahip sabitler olmakla birlikte σ_k ve σ_ε ise sırasıyla k ve ε için türbülanslı Prandtl sayılarıdır. ($C_{1\varepsilon}$ =1.44, $C_{2\varepsilon}$ =1.92, C_μ =0.09, σ_k =1.0, σ_ε =1.3).

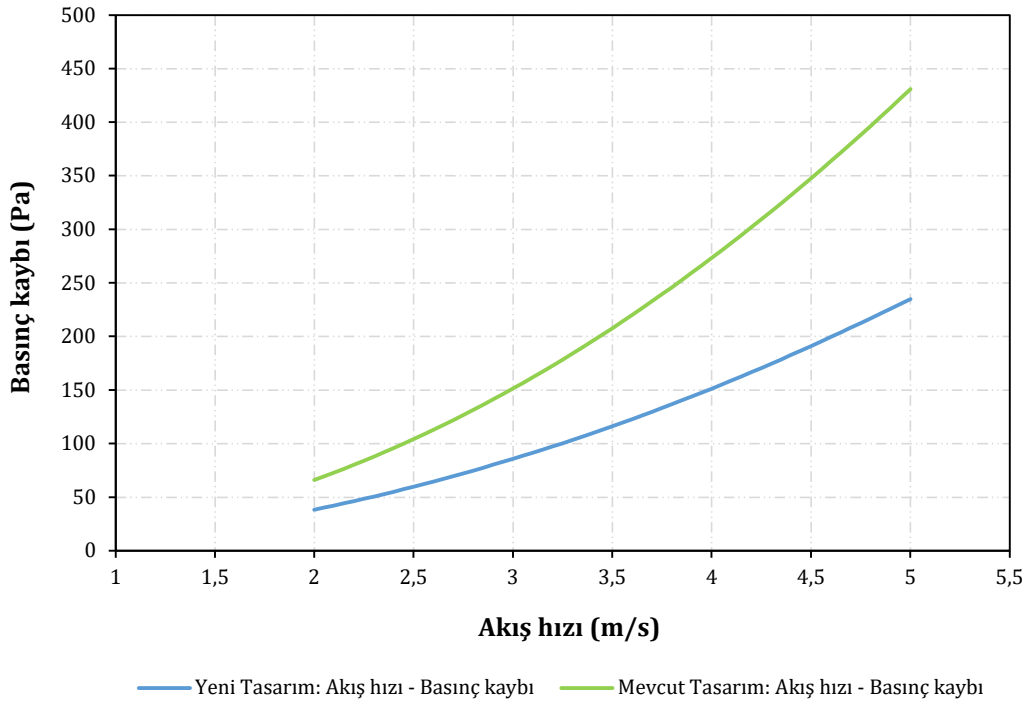
III. SONUÇLAR

Çalışmada, tekstil klima santrallerinin bileşeni olan havuzların çıkış kısmında hava akımının taşıdığı su damlacıklarının tutularak havuz dışına taşınmaması amacıyla kullanılan damla tutucuların, hava akımına karşı oluşturduğu direnç ve üzerinden geçen akışın karakteristik özellikleri incelenip, yüksek akış hızlarında optimum basınç kaybı ile su tutma verimliliğinin artırılmasına yönelik yeni damla tutucu tasarımı gerçekleştirilerek sayısal çalışmalar yürütülmüştür. İlk aşamada mevcut durumda kullanılan damla tutucu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiş ve ardından mevcut damla tutucunun tasarım mimarisinden yararlanarak yeni bir damla tutucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise yine HAD ile yeni damla tutucu üzerinde gerçekleşen akışın karakteristiği incelenmiş ve tasarımsal

optimizasyon yöntemi kullanılarak yeni tasarım finalize edilmiştir. Ayrıca, damla tutucuların üzerinden geçen hava akış hızı ile basınç düşümü arasındaki ilişki ve hava yıkayıcılarda kullanılması öngörülen hava akış hızlarında damla tutucular arasındaki boşluk uzunluğunun basınç düşümü ile ilişkisi sayısal yöntemle incelenmiştir.

A. Sayısal Analiz Sonuçları

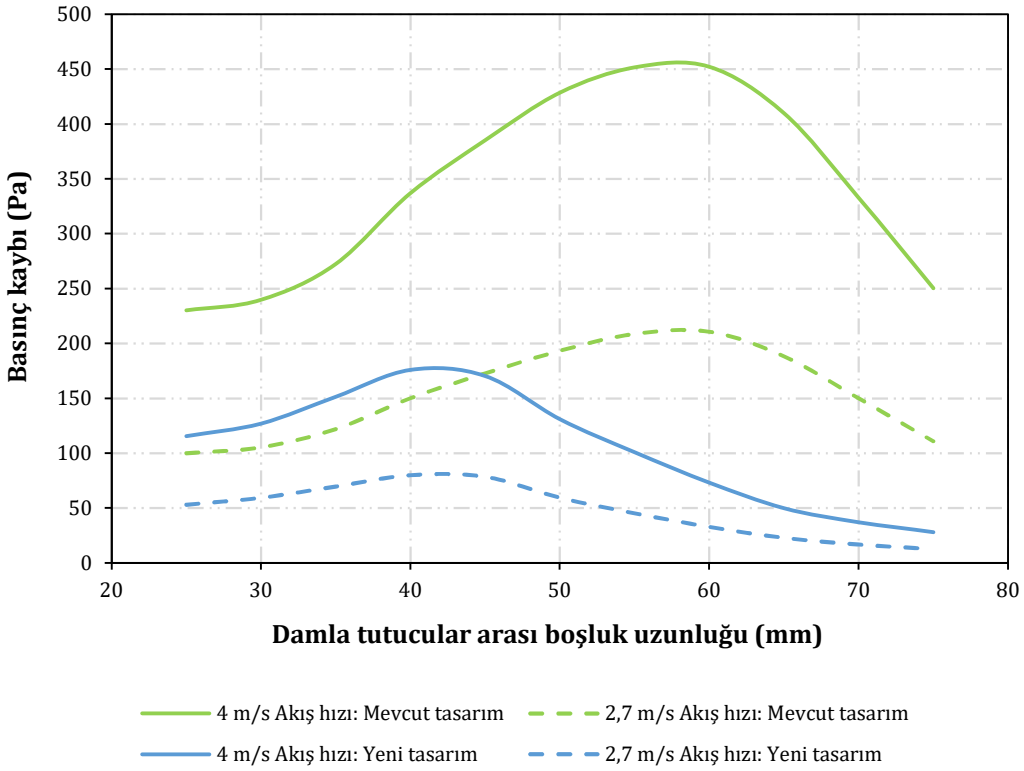
Tekstil klima santrallerinin havuzlarında kullanılan mevcut ve yeni tasarlanan damla tutucuların, 2 m/s ile 5 m/s arasındaki hava akış hızı değişimine bağlı olarak basınç düşümünün incelenmesi amacıyla, damla tutucular arası boşluk uzunluğu 35 mm olarak sabit tutularak sayısal analiz çalışmaları yürütülmüştür. Elde edilen sonuç grafiği Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Tasarımların Hava akış hızı – Basınç kaybı karşılaştırması

Gerçekleştirilen tasarımın, 2 m/s ile 5 m/s arasındaki değişen hava akış hızlarında mevcut damla tutucuya kıyasla daha az hava akış direncine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6). Yeni tasarımın basınç kaybı, 2 m/s akış hızında mevcut tasarıma göre %41,85 daha azdır (sırasıyla 38 Pa ve 66 Pa); 5 m/s akış hızında ise %45,46 daha azdır (sırasıyla 235 Pa ve 430 Pa). Mevcut damla tutucusunda, akış hızı arttıkça direnç artışı, yeni tasarıma kıyasla daha dik bir eğime sahiptir.

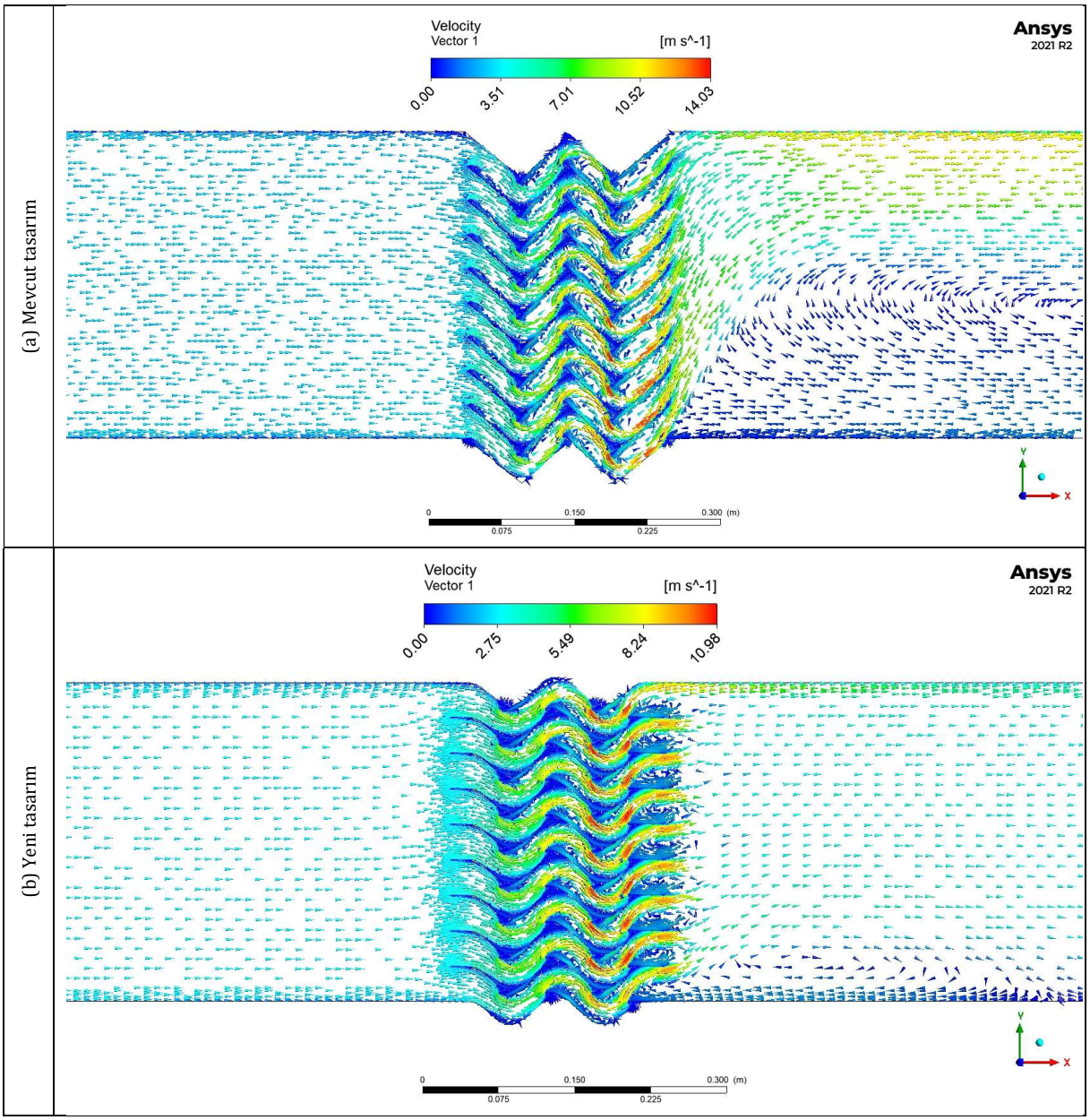
Havuzlardaki damla tutucular arasındaki boşluk ölçüsü, basınç kaybını etkileyen kritik parametrelerden biridir. Havuzların boyutlandırılmasında ise en önemli parametre hava akış hızıdır. Mevcut durumda, havuzlarda 2,7 m/s hava akış hızı temel alınarak boyutlandırma yapılmaktadır. Ancak, yüksek hava debisi gerektiren klima projelerinde bu akış hızı nedeniyle havuzlar çok büyük boyutlara ulaşabilmektedir. Havuzun daha küçük boyutlarda tasarlanması gerektiğinde ise hava akış hızının artmasıyla sistemdeki statik basınç kayıpları yükselecektir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak, 2,7 m/s ve 4 m/s akış hızları altında damla tutucular arasındaki boşluk uzunluğunun basınç düşümüne etkisi sayısal olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçların grafiği Şekil 7'de sunulmuştur.



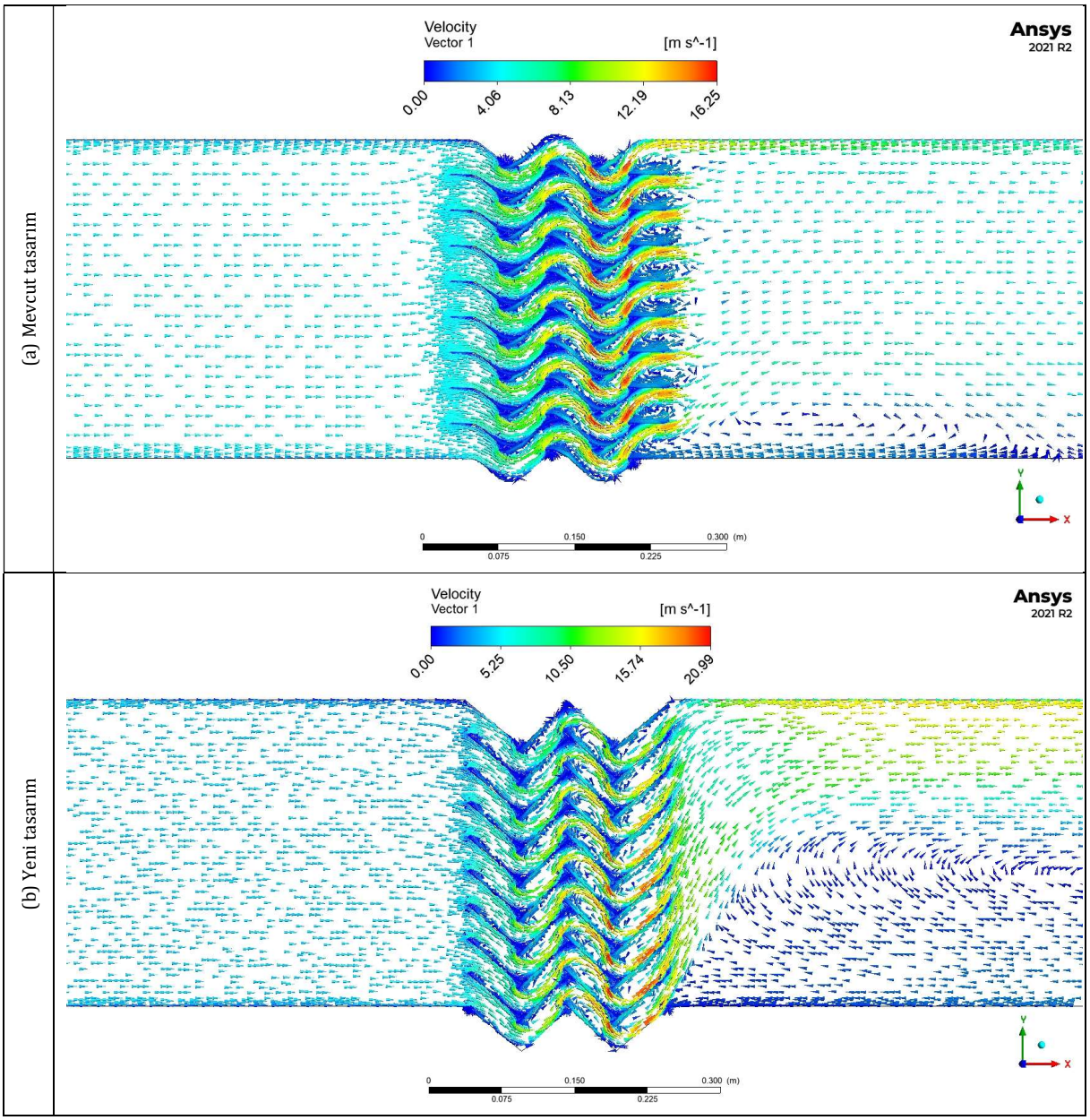
Şekil 7. Mevcut tasarım: Damla tutucular arası boşluk uzunluğu – Basınç kaybı grafiği

Şekil 7 incelendiğinde, 2,7 m/s akış hızında yeni tasarım damla tutucusunun, mevcut damla tutucusuna kıyasla farklı boşluk uzunlukları için daha düşük basınç kaybına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Yeni tasarım mevcut tasarıma kıyasla 30 mm boşluk için %43,61 (46,91 Pa); 40 mm boşluk için %46,73 (70,16 Pa); 50 mm boşluk için %69,23 (133,84 Pa); 60 mm boşluk için %84,39 (177,84 Pa); 70 mm boşluk için %88,78 (133,25) daha düşük basınç kaybına sahiptir. 4 m/s akış hızında ise, yeni tasarım, mevcut tasarıma göre 30 mm boşluk için %47,02 (112,72 Pa); 40 mm boşluk için %47,77 (160,97 Pa); 50 mm boşluk için %69,42 (297,52 Pa); 60 mm boşluk için %83,80 (379,08 Pa); 70 mm boşluk için %88,84 (295,88 Pa) daha düşük basınç kaybına sahiptir.

Damla tutucuların çıkışında akışın düzgün yönlendirilmesinin, basınç kayıplarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Sayısal çalışmalarda, çıkış bölgesindeki akış karakteristiği de dikkate alınmış olup, mevcut damla tutucusu ve yeni tasarlanan damla tutucusunun boşluk ölçüsü 35 mm sabitlenerek 2,7 m/s ve 4 m/s hava akış hızlarında oluşan akışın vektörel dağılımı sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. 2,7 m/s hava akış hızında tasarımlarda meydana gelen akışın vektörel dağılımı; a) mevcut tasarım ve b) yeni tasarım



Şekil 9. 4 m/s Akış hızında tasarımlarda meydana gelen akışın vektörel dağılımı; a) mevcut tasarım, b) yeni tasarım

Şekil 8 ve Şekil 9'da mevcut tasarıma ait hız vektörleri incelendiğinde, damla tutucu çıkışında hava akımının sol (üstten bakıldığında) tarafa doğru yönlendiği gözlemlenmektedir. Bu yönlendirme, çıkıştaki sağ tarafta vortekslerin oluşmasına neden olmaktadır ve gerçek çevre koşullarında havuz çıkışında akış düzensizliklerinin ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

Yeni tasarlanan damla tutucuların hız vektörleri incelendiğinde ise, damla tutucu çıkışında akışın oldukça düzgün bir şekilde yayıldığı görülmektedir. Çıkışta bir miktar vorteks oluşumu gözlemlense de, kısa bir mesafe sonra bu akış düzensizliğinin düzeldiği gözlemlenmektedir.

IV. DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışma ile tekstil klima santrallerinin havuzlarında kullanılmak üzere yüksek hava akış hızında (optimum 4 m/s) düşük akış direncine sahip yeni bir aerodinamik damla tutucu geliştirilmiştir. Bu kapsamda, mevcutta kullanılan standart damla tutucunun 2 m/s ile 5 m/s aralığında akış karakteristiği nümerik olarak incelenmiştir. Mevcut tasarımın metrikleri ve akış karakteristiği temel alınarak, çalışma isterlerini sağlayacak yeni tasarımın parametrik olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları ve parametrik analiz çalışmaları ANSYS Fluent 2021.2 yazılımında iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda 4m/s hava akış hızında düşük akış direncine sahip yeni bir damla tutucu tasarımı ortaya konulmuştur.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- 2 m/s akış hızında, yeni tasarımın basınç kaybı mevcut tasarıma göre %41.85 (38 Pa ve 66 Pa sırasıyla), 5 m/s akış hızında ise %45.46 (235 Pa ve 430 Pa sırasıyla) oranında düşmüştür.
- Tasarımların akış direnci değişimi değerlendirildiğinde, hava akış hızı arttıkça mevcut tasarımın hava akış direnci daha fazla artmaktadır.
- Damla tutucunun plakları arasındaki boşluğun hava akış direncine etkisi karşılaştırıldığında, yeni tasarımda plaklar arası boşluğun oluşturduğu etki daha düştür.
- Yeni tasarımda damla tutucu plakalar arası boşluk, basınç kaybı ve optimum akış hızı göz önünde bulundurulduğunda ideal değer 35 mm olarak belirlenmiştir.
- 2,7 m/s ve 4 m/s hava akış hızlarında tasarımların çıkışındaki akış karakteristiği irdelendiğinde, mevcut tasarımda büyük hava dönüşleri (türbülans) yapıları görülürken, yeni tasarım daha düzgün bir akım çizgilerine sahiptir. Bu sonuçlar, yeni damla tutucu tasarımının hem enerji verimliliğini artırabileceğini hem de sistemdeki türbülansı azaltarak stabil bir akış sağlayabileceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışma için maddi ve manevi destek veren Temsan Makina ve Tekstil San. Tic. A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

[1] Turna, B. (2020). *Eksenel fanlarda enerji verimliliği: Tekstil sanayi örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[2] Stodůlka, Jiří, and Rut Vitkovičová. *"Design and CFD Simulation of the Drift Eliminators in Comparison with PIV Results."* EPJ Web of Conferences. Vol. 92. EDP Sciences, 2015.

[3] Banitabaei, Sayed Abdolhossein, Hassan Rahimzadeh, and Roohollah Rafee. *"Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator."* Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering 7.4 (2012): 590-597.

[4] Chan, Joseph, and Michael W. Golay. *"Comparative performance evaluation of current design evaporative cooling tower drift eliminators."* Atmospheric Environment (1967) 11.8 (1977): 775-781.

[5] Galletti, Chiara, Elisabetta Brunazzi, and Leonardo Tognotti. *"A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels."* Chemical engineering science 63.23 (2008): 5639-5652.

[6] James, P. W., et al. *"The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators."* Chemical Engineering Research and Design 81.6 (2003): 639-648.

[7] Narimani, Elhame, and Shahrokh Shahhoseini. *"A comparison between two types of vaned mist eliminators."* The 6th International Chemical Engineering Congress and Exhibition (2009).

[8] Lucas, M., P. J. Martínez, and A. Viedma. *"Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators."* Energy Conversion and Management 50.3 (2009): 490-497.

[9] Ruiz, J., et al. *"Experimental study on pressure loss and collection efficiency of drift eliminators."* Applied Thermal Engineering 149 (2019): 94-104.

[10] Yu, Zhikang, et al. *"Water recovery efficiency improvement using the enhanced structure of the mist eliminator."* Process Safety and Environmental Protection 154 (2021): 433-446.

[11] Venkatesan, G., N. Kulasekharan, and S. Iniyan. *"Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency."* Desalination 339 (2014): 40-53

[12] Zamora, B., and A. S. Kaiser. *"Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation."* Chemical Engineering Science 66.6 (2011): 1232-1245.

[13] Inc, A. N. S. Y. S. (2013). *ANSYS FLUENT theory guide*. ANSYS, Inc Canonsburg, 90311-2.

[14] Hoffmann K.A., *"Computational Fluid Dynamics For Engineers*", Austin, TX 78713- 8148, USA, First Edition

[15] Karaokur, H. İ., (2019). *Salyangoz gövdeli radyal fan performansının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş.

[16] Chowaid M., (2016), *Numerical study of influence of air ceiling diffusers on room air flow characteristics,* Yüksek Lisans Tezi Çankaya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Microstructural Investigation of MAG Welded X120Mn12 Steel Joints

Fatih ÖZEN[a*]

[*a]Welding Programme, Department of Machine and Metals, Beşiri Industrial Organized Zone Vocational College, Batman University 72060, Batman, Turkey

[*] **Corresponding Author:** fatih.ozen@batman.edu.tr

ABSTRACT

In this work, X120Mn12 steel was joined with metal active gas (MAG) welding method. X120Mn12 steel is a type of well-known Hadfield steels, contains 12.5% Mn, 1.5 Cr, 1.2 C and 0.4 Si. Although wear resistance and cold working performance is high, weldability of Hatfield steels are poor due to high Mn and C content. SG-2 welding wire was employed in welding. The base metal of the X120Mn12 have exhibited a fully austenitic microstructure. The size of the grains in the heat affected zone decreased and achieved to finest point at the interface of the fusion zone. The suppression of the austenite is disrupted in the fusion zone. Due to low C that diffuses in the FZ decreases the C content disrupted the austenite suppression. Secondary alloys that not solute in the α-Fe formed between grains in fusion zone, yielding high hardness. Also, high Mn increased the critical temperature, caused solidification cracks and hot cracks in the fusion zone. For this reason, the hardness in the fusion zone was increased and brittle nature of the fusion zone results in early failure.

Keywords: *X120Mn12, SG-2, MAG welding, microstructural characterization*

I. INTRODUCTION

The advanced steels with high resistance to wear and dynamic loads are employed in the mining industry. Unexpected failure of the mining equipment and machine parts causes substantial financial loss since it lead to production downtime, halt of production, waste the manpower [1]. For this reason, the steels should be developed based on labor and working conditions [2].

New steel types have been developed in the steel industry. One of them is Hatfield steels. These steels contain austenizing elements in their microstructure such as Mn and C between 11-13% and 0.8-1.2%, respectively [3]. Normally, to achieve a fully austenitic structure, at least %20-w.t. of Mn should be added in the microstructure. However, even a low amount of C makes possible to stabilize the austenite in room temperature. The fully austenitic microstructure was enabled by adding low amount of Mn up to 12%.

There are two types of main deformation in metallic materials. These are twinning and shearing. Mechanical loads and impacts cause twinning rather than shearing in Hatfield steels due to fully austenite microstructure. Successive twinning behavior pretend like a grain boundary, and it acts like divided grains. Also, M_3C type carbide precipitations give rise to new dislocations in the Hatfield steels [4]. The transformation to epsilon martensite from the austenite is another deformation hardening mechanism in these steels [5]. The deformations make the steel more rigid with ductile inner microstructure. Therefore, these steels are ideal candidate for crushing operations [6].

Although the Hatfield steels has good mechanical properties, their weldability is poor. The X120Mn12 steel, which is a member of Hatfield steel, has 12% of Mn and 1.2 C content. High Mn and C decrease their weldabilities. Especially, employing the filler metals that has low C and Mn is also increases difficulty of the welding. In this work, metal active gas (MAG) welding was applied to X120Mn12 steel with SG-2 filler metal. The microstructural characterization was evaluated in detail.

II. Material and Method

X120Mn12 steel with 3-mm thickness was sliced to 200x200-mm dimensions. Table 1 shows Chemical composition of X120Mn12 steel and SG-2 filler metal. The sliced parts were cleaned with acetone to remove dirt from the application surface. The specimens were fixed in a welding fixture to attain right position alignment. The MAG welds were applied a welding robot with Panasonic MIG/MAG welding machine. The specimens were welded with 350 mm/min welding speed with 160-A welding current. HB212 HABAŞ brand gas was used in experiments with 10 l/min flow rate. The active gas was composed of 86% of Ar, 12%of CO2 and %2 of O.

Table 1. Chemical composition of X120Mn12 steel and SG2 welding filler wire.

	Elements (w.t.-%)						
Material	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**P**	**S**	**Rest**
X120Mn12	1.21	0.44	12.51	1.55	0.08	0.42	Fe
SG2 filler	0.07	0.88	1.47	-	-	-	Fe

Following welding, the cross section was cut with precision cutter and molded. The conventional metallographic procedures were adopted. The microstructure was etched in 2 steps. %5 of Nital solution for 5 sec and glyceria solution for 180 sec were employed to reveal fusion zone (FZ) and heat affected zone (HAZ), respectively. Nikon L150A microscope with clemex image visualization software was used.

III. Results and Discussion

Figure 1 shows base metal of the X120Mn12 steel. The base metal exhibits single phase of grains. These grains represent the austenite phase. The size of the grains varied between 20-118 µm. Since the glyceria etch the M_xC phase, the intergranular black zones are $(Fe, Mn)_xC$ phases. Some twins are formed in the grains. These twins are generally stemmed from heat treatment operations.

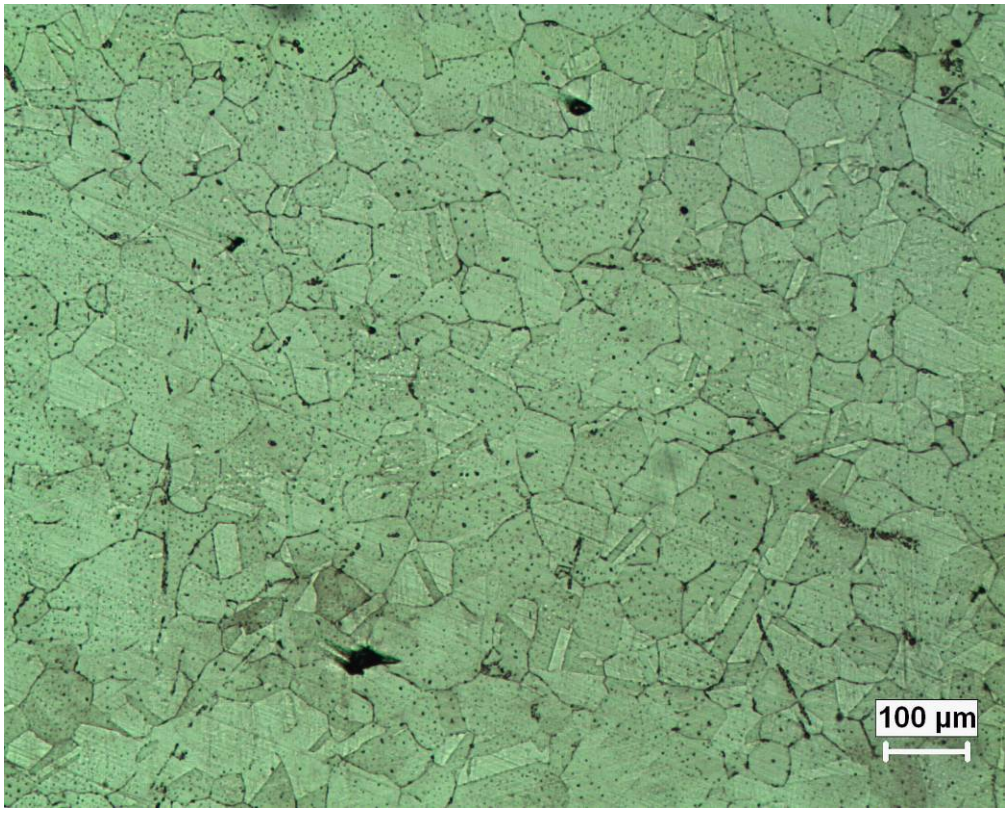


Figure 1. Base metal of the X120Mn12 steel.

Figure 2 shows HAZ of the X120Mn12 steel joint. The HAZ region consisted of grain coarsening and interlayer regions. In the interlayer zone, the recrystallized grains formed a fine-grained structure. Rolling lines which is chemically not homogenous affect the grain integrity in the interlayer. It was observed that the grains are also divided by the rolling lines at the interlayer in HAZ.

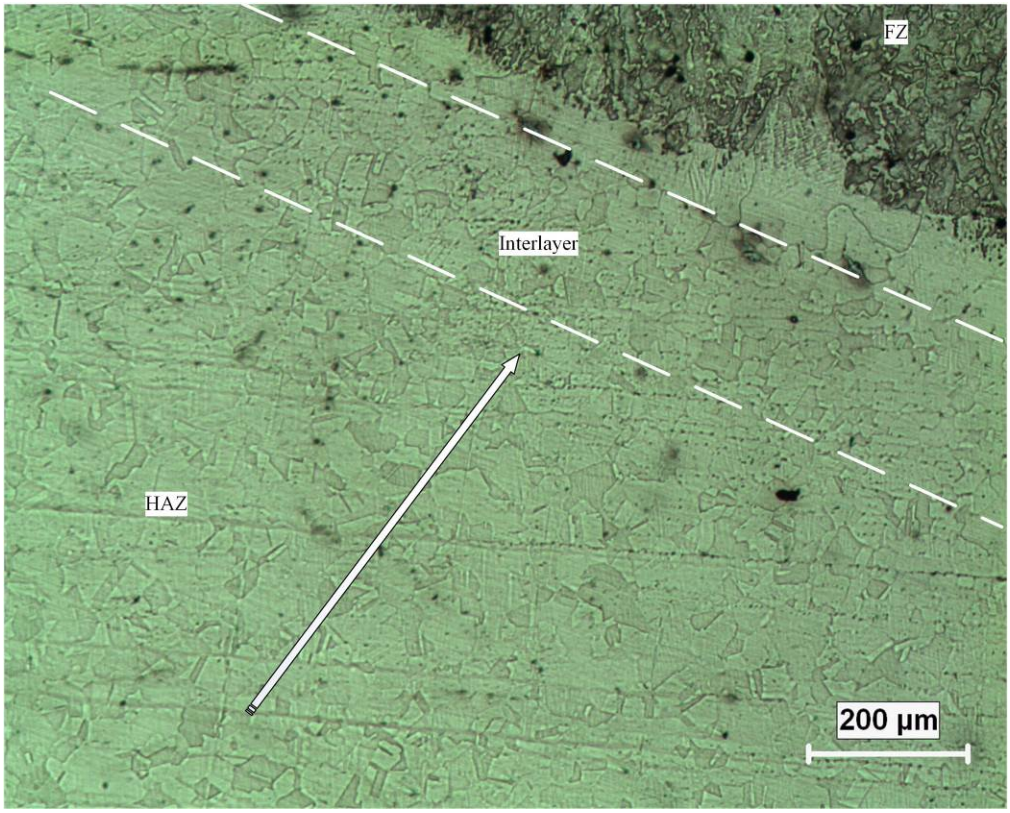


Figure 2. Heat affected zone of the X120Mn12 steel.

Microstructures of the FZ and some defects is presented in Figure 3.a-c. The FZ exhibits a fully dendritic structure. Some pores, intergranular voids and shrinkage voids are common defects in the FZ.

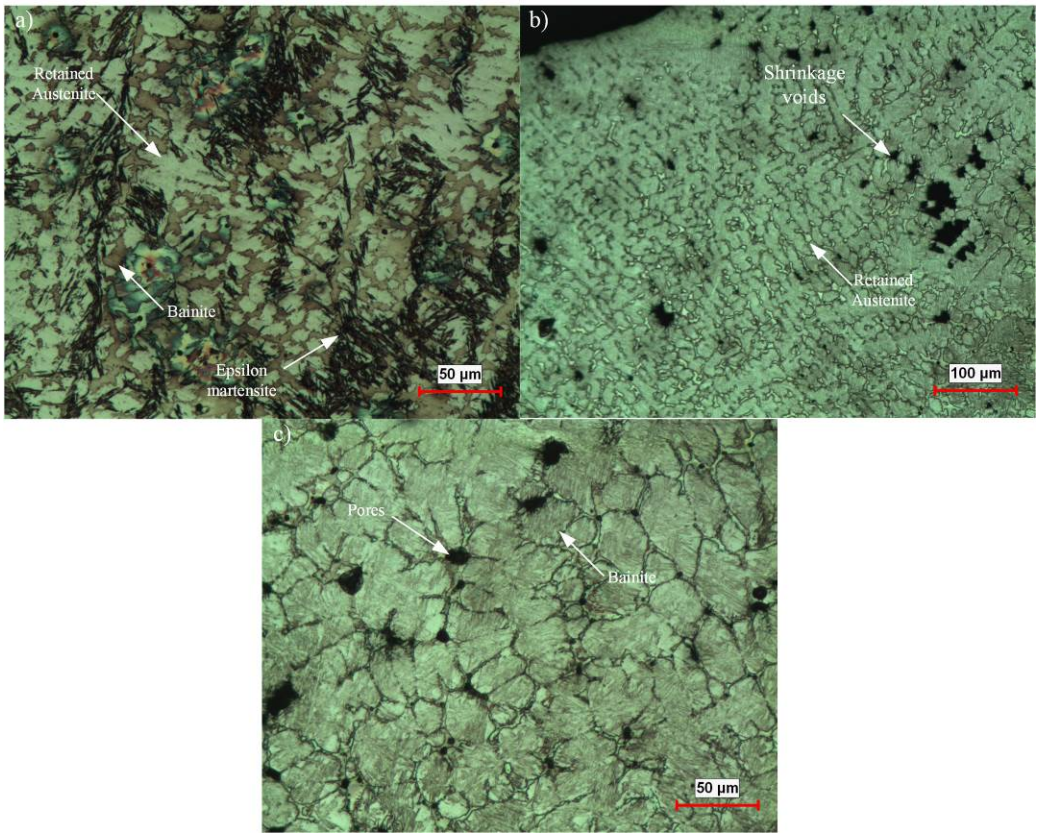


Figure 3. Fusion zone of the X120Mn12 steel

Retained austenite was formed between the dendrites due to loss of austenite stabilization. The decrease in the C can be attributed to diffusion of from the SG-2 filler wire. The austenite suppression was achieved by high C level up to 1.2 %-w.t. Decrease in C level resulted in disruption of austenite stability at room temperature. During the solidification, the α-Fe rich filler metal, which has a maximum solubility of %0.025 C, results in formation of bainite and martensitic phases in the FZ. The α-Fe transforms from austenite at AC3 critical temperature. The Fe_3C plates in bainite transformed into austenite formed. Below AC1 critical temperature, retained austenite was remained since the high concentrations of C allows stability of the austenite.

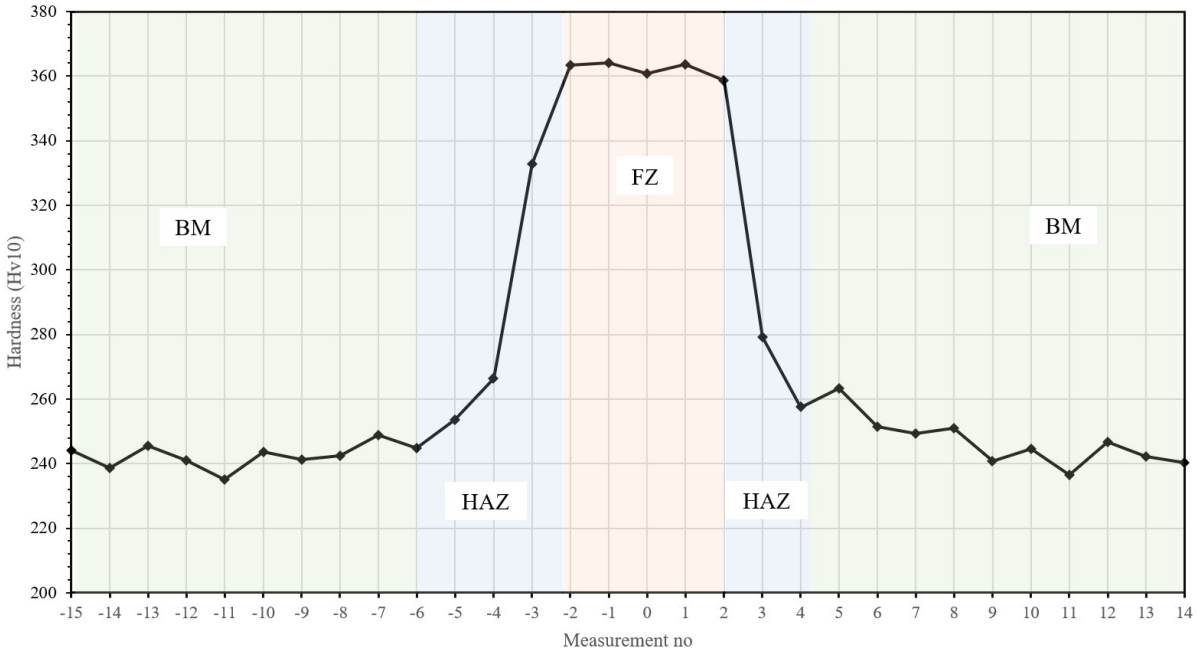


Figure 4. Line hardness measurements of MAG welded X120Mn12 steel.

Line hardness measurements of MAG welded X120Mn12 steel is shown in Figure 4. According to the results, the BM has exhibited hardness range between 232-264 Hv10. In HAZ regions, the hardness was increased. The FZ compromised of the maximum hardness that measured between 360.4-364.7 Hv10. The disruption of austenite suppression resulted in transformation to bainite and martensite. Therefore, hardness of the FZ was increased.

Another factor to disrupt the austenite suppression is usage of the active gas. The availability of the oxygen content in the shielding gas, is expected to result in formation of C and O derivatives such as CO_2 and CO [7].

IV. Conclusions

The X120Mn12 Steel, which is a member of Hatfield steels, was welded with MAG technique. The microstructural investigation has been made to reveal the joining characteristics. It was found out that disruption of the austenite stability has resulted in high hardness in the fusion zone. The fusion zone compromised the hardest point in the weld joint. Namely, the fusion zone exhibits a brittle behavior. Intergranular voids, shrinkage voids and retained austenite were formed between grains in FZ.

V. References

[1] P. K. Farayibi, M. Blüm, W. Theisen, S. Weber, "Development of Multilayer Sinter Cladding of Cold Work Tool Steel on Hadfield Steel Plates for Wear-Resistant Applications," *Journal of Materials Engineering and Performance* 28, 1833–1847, 2019.

[2] V. Lazič, A. Sedmak, D. Milosavljević, I. Nikolić, S. Aleksandrović, R. Nikolić, M. Mutavdžič, "Theoretical and experimental estimation of the working life of machine parts hard faced with austenite-manganese electrodes," *Materiali in Tehnologije* 46, 547–554, 2012.

[3] H. Berns, N. Nabiran, L. Mujica, "High-Interstitial Stainless Austenitic Steel Castings," *steel research international* 84, 119–

128, 2013.
[4] M. Dziubek, M. Rutkowska-Gorczyca, W. Dudziński, D. Grygier, “Investigation into Changes of Microstructure and Abrasive Wear Resistance Occurring in High Manganese Steel X120Mn12 during Isothermal Annealing and Re-Austenitisation Process,” *Materials* 15, 2022.
[5] O. Žďánský, A. Kříž, “Defects evaluation on hadfield steel sheets,” *METAL 2016 - 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 604–609, 2016.
[6] M. Dziubek, M. Rutkowska-Gorczyca, D. Grygier, “The effect of the austenitisation temperaturefor the two-stage heat treatment of high-manganesesteels on its wear resistance under abrasiveconditions,” *Tribologia* 305, 19–29, 2023.
[7] X. Zhao, K. Ren, X. Lu, F. He, Y. Jiang, “Study on fusion boundary microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel-nickel based dissimilar alloy materials welded joints,” *Engineering Fracture Mechanics* 281, 109140, Elsevier Ltd, 2023.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Isıl Vakum Test Sistemi Operasyonu ve Gaz Salınımı

Murat Bulut[a], Nedim Sözbir[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Rektör., Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** muratbulut@sozbir.edu.tr

ÖZET

1957 yılında ilk uydu Sputnik uzaya gönderildiğinden bu yana uzay ve uydu teknolojileri ilerlemiştir. Gönderilen Sputnik uydusu ile uzayda zorlu şartların olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple uzaya gönderilecek uyduların uzay ortam şartlarında çalışması için çalışmalar uydu teknolojileri üzerine çalışan üretici firmalar tarafından yapılmıştır. Uydular uzaya gönderilmeden önce yerde birçok testlere maruz bırakılmaktadır. Uydu testleri genel olarak mekanik, ısıl ve haberleşmeden oluşmaktadır. Mekanik testler olarak akustik, titreşim, kütle özellikleri ölçümler olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Haberleşme olarak kompant anten ve elektromanyetik uyumluluk (EMI/EMC) testi yapılmaktadır. Bu testlerin hepsinden uyduların başarılı olarak çıkması istenmektedir. Bu testlerden biri de ısıl vakum testleridir. Isıl vakum testleri gaz salınımı, ısıl denge ve ısıl döngü testlerinden oluşmaktadır. Uyduların ısıl vakum testleri, ısıl vakum test sistemi içerinde yapılmakta ve malzeme gaz salınımlarıda bu süreçte gerçekleşmektedir. Bu çalışmada uyduların ısıl vakum testlerinin yapıldığı uydu ısıl test sisteminin operasyonu ve testler sırasında malzemede gerçekleşen gaz salınımları hakkında bilgiler verilecektir.

Anahtar Kelimeler: *Gaz salınımı, ısıl test, ısıl vakum, uydu*

Thermal Vacuum Chamber Test System Operation and Outgassing

ABSTRACT

Space and satellite technologies have advanced since the first satellite, Sputnik, was sent into space in 1957. With the Sputnik satellite sent, it was observed that there were harsh conditions in space. For this reason, studies have been carried out by manufacturers working on satellite technologies to ensure that the satellites to be sent into space operate under space environmental conditions. Satellites are subjected to many tests on the ground before they are sent into space. Satellite tests generally consist of mechanical, thermal and communication. Mechanical tests consist of three parts: acoustic, vibration and mass properties measurements. Compact antenna and electromagnetic compatibility (EMI/EMC) tests are performed for communication. The satellites are expected to pass all these tests successfully. One of these tests is thermal vacuum tests. Thermal vacuum tests consist of gas release, thermal balance and thermal cycling tests. The thermal vacuum tests of the satellites are carried out within the thermal vacuum test system and the material gas emissions are also realized in this process.

In this study, information will be given about the operation of the satellite thermal test system, where the thermal vacuum tests of the satellites are performed, and the gas emissions that occur in the material during the tests.

Keywords: *Outgassing, thermal test, thermal vacuum, satellite*

I. GİRİŞ

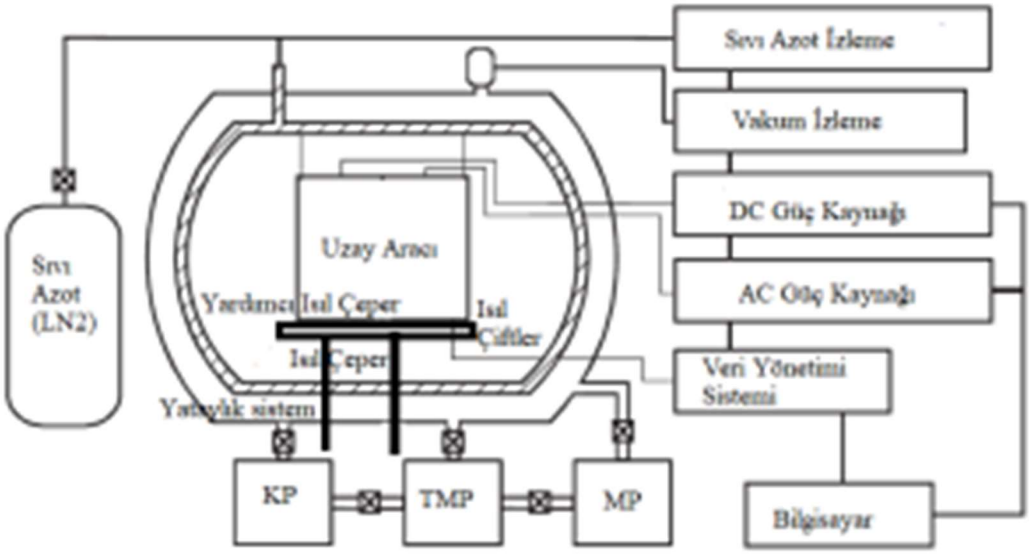
Uzayda uydular/uzay aracı zorlu çevresel şartları maruz kalmaktadır. Uydunun operasyonları sırasında derin uzay sıcaklığı yaklaşık 4K olup bu sıcaklıkta uydu için tanımlanmış olan misyon çerçevesinde operasyonlarını devam etmesi gerekmektedir. Isıl kontrol alt sistemi (IKS) (Thermal Control Subsystem-TCS) uyduların en önemli alt sistemlerinden biri olup uydularda yer alan elektronik ekipmanlardan yapısal malzemelere kadar bütün parçaların operasyonel sıcaklıklar kalmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada uyduların test yapıldığı ısıl vakum test sistemi (IVTS) (thermal vacuum test system) operasyonu ve gaz salınımı hakkında bilgiler verilecektir.

II. ISIL VAKUM TEST SİSTEMİ

Isıl vakum odası (Thermal Vacuum Chamber-TVAC), uzayda uyduların maruz kalacağı sıcaklık ve vakum ortamını simüle eden tesislerdir. Isıl vakum odası, soğuk vakum odası, ısıl kontrol sistem ve veri yönetim sisteminden oluşmaktaktadır [1].

Soğuk vakum odası yardımı ile sıcaklık ve vakum seviyeleri istenilen seviyelerde tutulmaktadır. Soğuk vakum odası, ana gövde, vakum pompalama sistemi ve soğuk sistemden oluşmaktadır. Ana gövde 304 paslanmaz çelikten yapılmakta olup sıvı/gaz azotun dolaşımının bulunduğu yerdir. Ana gövdede flanşlar, kriyojenik pompaların bağlantı yerleri, sıvı ve gaz azotun giriş ve çıkışlarının yer aldığı bağlantı noktaları bulunmaktadır. Vakum pompalama sistemleri birincil ve ikinci pompalama sistemlerinden oluşmaktadır. Şekil 1'de ısıl vakum test sisteminin şeması yer almaktadır.



Şekil. 1 Isıl vakum test sistem şeması [2]

Birincil pompalama sisteminde mekanik pompalar, ikincil pompalama sisteminde turbo moleküler ve kriyojenik pompalar yer almaktadır. Mekanik pompa (MP), turbo moleküler pompa (TMP) ve kriyojenik pompalar (KP) sayesinde IVTS içerisinde basınç $1x10^{-5}$ mbar altına düşürülür. Vakumlama öncelikle mekanik pomplama ile başlanır. Sonrasında moleküllere kinetik enerji vererek ortamdan atılmasını sağlayan turbo moleküler pompalar kullanılır. En son aşamada en yüksek vakum ortamı kriyojenik pompa ile sağlanmaktadır. Kriyojenik pompa içerisinde yer alan kafada helyum gazı helyum pompaları kullanılarak -263 ^{o}C'de ortam sıcaklığında oluşur. Bu sayede havada bulunan helyum ve hidrojen gazları dışında bütün molekülleri dondurarak hareketlerini durdururlar [3].

Soğutma sistemi sıvı azot (liquid nitrogen-LN2), gaz azot (gaseous nitrogen-GN2) ve helyum (He) gazından oluşmaktadır. Sıvı azot ve gaz azot ısıl vakum ana gövdesinde yer alan kanallarda yer almaktadır. Bu kanalların oda içine bakan kısımları siyah boya ile anılan ışıma katsayısı yüksek olan boyalar ile kaplı olup diğer yüzeyleri düşük ışınım katsayısı olacak şekilde parlatılmaktadır. Helyum gazı sadece kriyojenik pompa sisteminde kullanılmaktadır. Uzayda mutlak sıcaklık değeri 4K (-269. 15 ^{o}C)'dir. Uzaydaki bu sıcaklığı ancak helyum gazı ile simüle etmek mümkündür. Helyum gazının maliyetinin yüksek olması ve Dünya'da sınırlı olması nedeni ile bu gazın yerine azot kullanılmaktadır. Azot yardımı ile vakum odasındaki sıcaklık -180 ^{o}C altına inilmektedir.

Su ısıl kontrol (Water Thermal Control-WTC) sistemleri ısıl vakum pompalamada yer alan vakum pompalarının çalışma sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Su soğutmalarını

chiller üniteleri kullanılarak yapılır. Chiller ünitelerinin arızalanması durumunda şebek suyu kullanılır. Chiller ünitesinin seçimleri ısı yükünün miktarı ile yapılmaktadır.

IKS'nin görevi uyduyu istenilen sıcaklıkta tutmak için kullanılmaktadır. Alternatif akım (Alternative Current-AC) ile çalışan ısıtıcılar, doğru akım (Direct Current-DC) ile çalışan ısıtıcılar ve ısıtıcıların kontrolünü sağlayan sistemlerden oluşmaktadır. Alternatif akım ile çalışan ısıtıcılar uyduların dış yüzeylerinde yer almakta olup genellikle calrod ve IR lamba türündedir. Doğru akım ile çalışan ısıtıcılar, uydunun içi kısmında yer almakta olup test ısıtıcılarıdır.

Isıl vakum odasını oluşturan sistemlerine ilaveten veri yönetimi sistemleride (VYS) yer almaktadır. VYS (Data Acquisition System-DAS) yardımı ile testlerde alınan anlık verilerin görülmesi ve depolanması yapılmaktadır. Veri yönetimi sistemi ile ısıl çiftlerden (thermocouple) alınan sıcaklık verileri, basınç sensörlerden alınan basınç değerleri, ısıtıcıları konumları (açık veya kapalı), valflerin konumları (açık veya kapalı) anlık olarak görülebilmektedir.

III. GAZ SALINIMI (OUTGASSING)

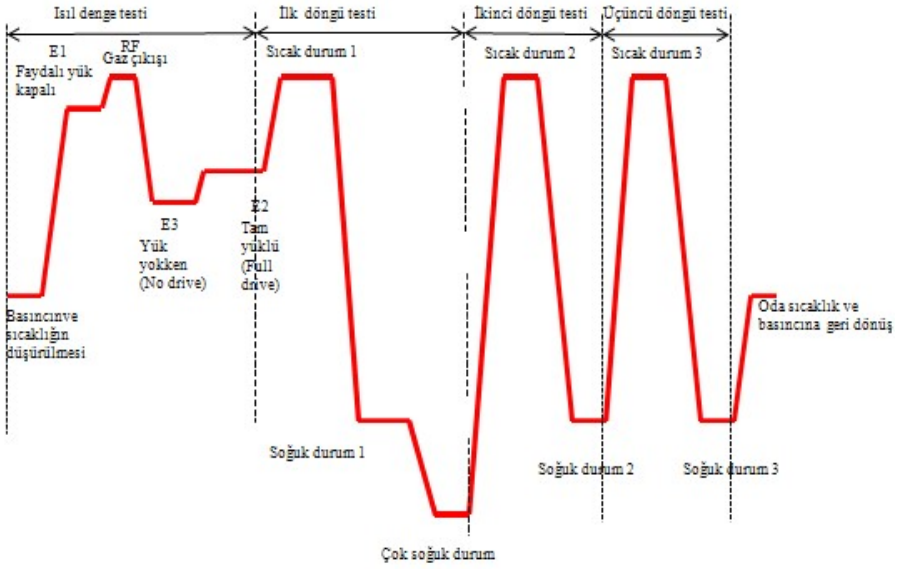
Gaz salınımı çok küçük basıncın olduğu ortamda malzemelerin molekül yapılarının bozulması sonucunda moleküllerin bulunduğu ortamda serbest halde dolaşma durumudur [4]. Malzemelerde gaz salınım sonucunda malzemelerin fiziksel yapılarında zayıflama oluşmakta ve malzemelerden ayrılan moleküllerin hassas ekipmanlar üzerine yapışması sonrasında performans düşüklüğüne ve bazı durumlarda ekipmanın tamamen devre dışı kalmasına sebep olmaktadır. European Space Agency (ESA) ve ASTM gaz salınım ölçümleri ile ilgili standartlar bulunmaktadır. Standartlarda, uzay ortamına maruz kalacak olan malzemelerin molekül bozulma seviyeleri testleri ve bozulma özellikleri yer almaktadır.

ESA ve NASA gibi uzay konusunda çalışmaları olan kuruluşlar malzeme gaz salınımı ile ilgili veri tabanları oluşturarak uzay araçlarında kullanılacak malzemeler ile ilgili seçimlerin yapılmasını kolaylaştırmışlardır. Bilinmeyen bir malzemenin uzay ortamındaki gaz salınımının nasıl olacağı konusunda tespitleri yapılması için gerekli olan testlerin yapılması çok pahalı ve zaman alıcıdır [5, 6]. Bu nedenle ESA ve NASA gibi kuruluşların veri tabanları kullanılarak malzeme seçimi yapılmaktadır.

Gaz salınımı temel olarak geri kazanılan kütle kaybı (GKKK) ile toplanmış kararsız toplanabilir malzeme (TKTM) oranları ile tanımlanmaktadır. ECSS ve NASA standartlarına göre uzay araçlarında kullanılacak olan malzemeler için bu oranlar %1 ve %0.1 den az olması istenmektedir [7, 8].

IV. ISIL VAKUM TEST SİSTEM OPERASYONU

IVTS operasyonları basınç düşürme ile başlayıp sırasıyla ısıl çeperlerin soğutulması, gaz salınımı, ısıl denge (thermal balance-TB), ısıl döngü (thermal cycling-TC), sıcak ve soğuk EPT testleri ve en son olarak oda koşullarına dönüş ile sonlanmaktadır. Şekil 2'de IVTS yapılan testlerin süreçleri görülmektedir [9].



Şekil. 2 IVTS operasyon süreçleri [9]

IVTS operasyonlar öncesinde birçok hazırlık yapılmaktaktadır. Test öncesi teste kullanılacak olan sıvı azotun tanklara doldurulması, tüm ısıl çiftlerin kontrolü, uydu içerisinde yer alana yataylık sensörünün kontrolü, uydu ile uydunun takılı olduğu taşıma arabası arasındaki topraklamanın kontrolü (<200 miliohms), uydunun dışında yer alan calrod veya IR ısıtıcıların kontrolü, çok katmanlı yalıtım battaniyelerin (ÇKYB) kontrolü, ısıl çeperlere giden sıvı azot hattı flanşların kontrolü, iç basınç ve yataylık sensör kontrolü, RF su soğutma ve IVTS su soğutma kontrolü, güç kanalları kontrolü, veri toplama sistemi kontrolü yapılmaktadır.

IVTS kapısı kapatılmadan önce açık kapı testleri (open door testing) yapılmaktadır. Sıvı azot tankının dolu olduğunun kontrolü yapılmalı ve uydu ile birlikte uçmayacak olan bütün kapaklar çıkarılmalıdır. Kirlilik ölçümünün gerçekleşmesi için kullanılan kirlilik plakaları (partiküler ve moleküler) takılmalıdır [10]. Kirlilik plakaların sayısı test yapan firma ve uzay aracının misyonuna bağlı olarak değişmektedir. Genelde silindir şeklinde olan IVTS'de silindir yapının ön, arka, iki yan ve ayrıca uzay aracının bağlı olduğu yer olmak üzere minimum 5 partiküler 5 moleküler kirlilik plakaları takılmaktadır. Testler başlamadan önce, veri toplama sistemi test öncesi başlatılır.

IVTS'de test basınç düşürme ile başlamaktadır. Basınç düşürmeye başlamadan önce uzay aracının testlerini icra edecek kişilere corona (discharge) ile ilgili bilgilendirme yapılmakta ve gerekli onay alındıktan sonra test başlamaktadır. ilk önce ön pompalama (birincil pompalama-primary pumping) ile vakum işlemine başlanır. IVTS içerisindeki basınç $1x10^{-1}$ mbar seviyesine inildiğinde soğuk kapana (cold trap) sıvı azot verilmeye başlanır. IVTS basıncı $1x10^{-2}$ mbar seviyesine inildiğinde ikincil pompalama (secondary pumping) 'da yer alan turbo moleküler pompalama işlemine başlanmaktadır. IVTS basıncı $1x10^{-4}$ mbar olduğunda helyum kaçak testi yapılır. Helyum kaçak örnek olarak $8,19x10^{-8}$ mbar*l/s olarak ölçülür.

Bir IVTS için sızıntı oranı denklem (1) olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$qL=V.(\Delta p/\Delta t) \quad (1)$$

qL, sızıntı oranı olup mbar/L'dir. *V,* vakum yapılan ortamın hacmi olup L'dir. *Δp*, vakum ortamında vakumun durdurulduğu andaki son basınç ile ilk basınç arasındaki fark olup mbar'dır. *Δt*, vakumlamanın durdurulup zamanın başlatılıp zamanın tekrar durdurulduğu süre olup saniye'dir.

IVTS basıncı $5x10^{-5}$ mbar seviyelerinde kriyojenik pompalama işlemi başlatılmaktadır. IVTS basıncı $1x10^{-5}$ mbar seviyesinden aşağıya düştüğünde ısıl çeperlerin soğutulması işlemine başlanmaktadır. Öncelikli olarak yardımcı ısıl çeper (auxiliary shroud)'e sıvı azot gönderilerek sıcaklığın <170+/-10°C olması sağlanır. Yardımcı ısıl çeperler uzay aracının alt kısmında yer alan kısımdır. Sıcaklık istenen seviyeye ulaştıktan sonra ve IVTS basıncı $8x10^{-6}$ mbar altına indiğinde ön, arka ve iki yan ısıl çeperlere sıvı azot gönderilmeye başlanmaktadır. IVTS basınç ($8x10^{-6}$ mbar) ve sıcaklıklar (<-180 ^{o}C) seviyelerine ulaştıktan sonra gaz

salınımı fazı başlanmaktadır. Gaz salınımı pasif ve aktif gaz salınımı olarak iki aşama halinde yapılmaktadır. Önce pasif gaz salınımı yapılmaktadır. Bu fazda uzay aracı belirli bir sıcaklığa uzay aracı dışında yer alan calrod ısıtıcılar ve gerekli olduğu taktirde uzay aracı içinde yer alan test ısıtıcıları kullanılarak belirli bir sıcaklığa çıkarılıp (örnek panellere 40-45 ^{o}C) ve belirli bir süre bekletilmektedir. Pasif gaz salınımı sonrasında aktif gaz salınımı başlamaktadır. Bu süreçte uzay aracı içerisinde yer alan her bir ekipman sıra ile açılıp belirli sıcaklığı gelene kadar sıcaklığı artırılıp bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi sağlanmaktadır.

Gaz salınımları tamamlandıktan sonra ısıl denge testine başlanmaktadır. Isıl denge testindeki amaç, matematik modelleme kullanılarak elde edilen sıcaklık değerlerinin test sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılıp modellemenin tekrar değerlendirilmesinin yapılmasıdır [9]. Isıl denge test sürecinde IVTS operasyonlarını gerçekleştiren personel ısıl analizlerini gerçekleştiren personelin istemiş olduğu konfigürasyonunda ekipmanların sıcaklıkları için gerekli olan test ısıtıcılarını ve calrodların çalışmasını sağlamaktır.

Isıl denge tamamlandıktan sonra ısıl döngü testine başlanmaktadır. Isıl döngü testi uzay araçlarında yer alan ekipmanların çalışma sıcaklık şartlarına maruz bırakılıp performansının kontrol edilmesi için yapılmaktadır. Genel olarak ısıl döngü testi sıcak durum, soğuk durum ve çok soğuk durumlar için yapılmaktadır. Isıl döngülerin döngü sayıları uzay aracının testlerini yapan firmalara göre değişim göstermek ile birlikte genellikle 3-5 arasında değişmektedir. Döngü test sürecinde her bir döngü sıcak soğuk ve geçişlerden oluşmaktadır. Şekil 2'de örnek olarak üç döngülü test görülmektedir. Bu süreçte uzay aracında yer alan her bir ekipmanın sıcaklı değerlerinin kabul (acceptance) ve kalifikasyon (qualification) sıcaklıkları arasında kalması sağlanmaktadır. Genellikle kalifikasyon sıcaklıklarına yakın olması istenmektedir. Bu sıcak döngülerde genellikle uzay aracı dışında yer alan calrod gücü artırılırken soğuk durumda calrod ısıtıcılar tamamen devreden çıkarılmaktadır. Uzay aracı içinde yer alan test ısıtıcıları da çalışması sağlanmaktadır. Isıl döngü tamamlandıktan sonra soğuk EPT ve sıcak EPT testleri yapılmaktadır. Bu süreçte faydalı yük ve platform ekipmanların performans testleri en soğuk ve en sıcak durumda yapılmaktadır.

Isıl döngü testi tamamlandıktan sonrada oda koşullarına dönüş için operasyonlar yapılmaktadır. Bu süreçte ısıl çeperlerin ısıtılma işlemlerine başlanmaktadır. RF su soğutma sistemi bu süreçte kapatılır. Kurutma işlemleri için sistem gaz azot 24 saat süresince gönderilmektedir. Yardımcı ısıl çeperlere giden sıvı azotun akış öncelikli kesilir ve ortalama sıcaklığın -100+/-5 ^{o}C olması beklenir. Sıvı azot tamamen ısıl çeperlerden boşalttığından emin olduktan sonra ısıl çeperlerin ısıtılma işlemine başlanır ve çeperlerde en düşük sıcaklık 18 ^{o}C seviyesine getirilir. Çeperlerin ısıtılma sürecinde IVTS basıncıda takip edilmelidir. Bütün sıcaklıkların çiğlenme sıcaklığından (<14 ^{o}C) yüksek olunduğundan emin olunması gerekir. Uzay aracı üzerinde yer alan ısıtıcıların kapalı olduğundan ve artık gaz analiz (RGA) cihazı kapatılır. IVTS basınçlandırma işlemi sistem gaz azot verilerek kontrollü olarak tamamlanır.

IVTS operasyonu tamamlandıktan sonra IVTS kontrol sistemi yardımı ile otomatik olarak kapı açılması sağlanır. Kapının açıldığı anda ortamdan herhangi bir insanın olması yoğun gaz azot olacağı gerekçesi nedeni ile istenmez. Belirli bir süre içerisinde ısıl vakum odası içerisinde yer alan gaz azotun dışarı çıkması beklenir. Gaz azotun çıktığından emin olunduktan sonra görevli personel oksijen sensörü yanında ısıl vakum odası kapısı içerisinde yer alan moleküler ve partiküler kirlilik plakaları alır. Plakaların analiz laboratuvarına yollanır. Moleküler kirliliğin <1x10^{-6} gr/cm^{2} ve partiküler kirliliğin <500 ppm den aşağıda olması istenmektedir. Uçmayacak (non-flight) etiketli korumaları ve kapaklarını yerleştirilir. Veri toplama sistemi durdurulur. Güç kaynakları kapatılır. Oda koşullarında işlevsel testlere başlanır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, uzay araçlarının maruz kaldığı çevresel testlerden ısıl vakum test sistemi, operasyonu ve gaz salınımı hakkında bilgiler verilmiştir.

Isıl vakum testler çevresel testlerin en uzun süreci olan test ve operasyonel olarak kullanılan gerek sıvı azot ve elektrik tüketimi olarak en maliyetli olan testtir. 3 metre çaplı 6 metre derinlikte bir ısıl vakum test sisteminde soğuk döngü boyunca yaklaşık 1 m^{3}/hr (693 lt/hr) sıvı azot harcanırken sıcak döngü boyunca 1.5-1.8 m^{3}/hr (1040-1248 lt/hr) sıvı azot harcanmaktadır. Uzay aracının misyonuna uygun olarak test süreci değişim göstermektedir. Süreç uzunluğu 3 hafta ile 6 hafta arası genellikle olmaktadır. Bu sebeple, sürecin sağlıklı bir şekilde test süresince yürütülebilmesi için önceden planlanması gerekir.

Isıl vakum testinin diğer testler (titreşim, akustik, kompakt anten, EMC) en büyük farkı, uzay aracında test sırasında meydana gelen herhangi bir olumsuzluk durumunda müdahale işlemi çok zordur.

KAYNAKLAR

[1] M. Bulut, A. Kahriman, N. Sözbir, ve Ş. Gülgönül, " Uzay Şartlarında Uydu Isıl Testlerinin Yapıldığı Vakum Oda Teknolojisi, " IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Hava Harp Okulu, İstanbul, 12-14 Eylül 2012.

[2] Nagano, H., Nagasaka, Y, "Simple Deployable Radiator with Autonomous Thermal Control Function, " Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 20 (4), October-December 2006.

[3] Savunma Sanayii Dergilik [Online]. Available: https://www.savunmasanayiidergilik.com/tr/HaberDergilik/TUSAs-in-yeni-yetkinligi-Isil-vakum-testi

[4] M. Şahin, H. İ. Erol, İ. E. Tekin, ve G. Güngör, "Uzay Araçlarında Eklemeli İmalatla Üretilmiş Termo-Plastik Malzeme Uygulamaları., Yapıldığı Vakum Oda Teknolojisi, " 9. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir, 14-16 Eylül 2022.

[5] NASA, Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials [Online]. Available: https:// outgassing.nasa.gov

[6] ESA, ESMAT Outgassing database [Online]. Available: http://esmat.esa.int/services/outgassing_data/outgassing_data.html 11

[7] ECSS-Q-ST-70-71C Rev.1 – Materials, processes and their data selection

[8] ECSS-Q-ST-70C Rev.2 – Materials, mechanical parts and processes

[9] M. Bulut, A. Kahriman, ve N. Sözbir, " Uydularda Isıl Kontrol, " *Termodinamik*, 209, 72-78, Ocak 2010.

[10] M. Bulut, N. Sözbir, ve M. M. Nefes, "Uydu Üretim ve Test Merkezlerinde Temiz Oda Uygulamaları, " *9. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı,* İzmir Ekonomi Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Mikromobilite ve Elektrikli Bisikletlerde Kullanılan Elektrik Motor Topolojilerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi

Ümit Yavuzarslan[a], Furkan Seçkiner[a], Emin Yıldırız[b]*

[a]Volta Motor San. Tic. A.Ş. Düzce/Türkiye.
Volta Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tasarım Merkezi, Cumayeri Fabrika, Düzce/Türkiye
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** tm_sef@volta.com.tr

ÖZET

Hızlı yaşam temposu ve şehir içi bireysel ulaşımdaki tercihlerin değişimiyle günümüzde mikromobilite araç kullanımı giderek artmaktadır. 25 km/sa altında hızla ulaşım sağlayan mikromobilite ve elektrikli bisikletlerin pazar büyüklüğünün 20 milyar $'a ulaştığı tahmin edilmektedir. Her ne kadar daha büyük güç ve hızdaki mobilite araçlarda kullanılan tahrik motor topolojileri ile ilgili, verimlilik, tork ve güç yoğunluğu, boyut, maliyet, tork titreşimi, kontrol edilebilirlik ve teknolojik doyum gibi parametreler üzerinden karşılaştırmalı incelemeler literatürde olsa da mikromobilite araçlarda kullanılan tahrik motorları ile ilgili böyle bir inceleme çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışmada mikromobilite taşıtları ve elektrikli bisikletlerin çalışma isterlerine uygun tahrik motor topolojilerinin üstünlük ve sakıncaları sıralanmıştır. Literatürde önerilen fırçasız DC motor (BLDC), sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) gibi sürekli mıknatıs içerikli motor topolojilerinin yanı sıra, anahtarlamalı relüktans motor (ARM) ve asenkron motor (IM) gibi motor topolojileri de aynı çalışma koşulları altında incelenmiştir. Seçilen karşılaştırma kriterlerine göre, ilgili topolojilerin performans değerlendirmeleri sonuç bölümünde yapılmıştır. Elde edilen bulgular, alanda çalışmaya başlayacak araştırmacılara ışık tutabilir ve yeni tahrik motoru tasarımlarına ve iyileştirme yaklaşımlarına fikir verebilir.

Anahtar Kelimeler: BLDC motor, İndüksiyon motoru, Mikromobilite, PMSM motor, Anahtarlamalı relüktans motor.

Comparative Examination of Electric Motor Topologies Used in Micromobility and E-bikes

ABSTRACT

Today, with the fast pace of life and changing preferences in urban individual transportation, the use of micromobility vehicles is increasing. It is estimated that the market size of micromobility and e-bikes, which provide transportation at speeds below 25 km/h, has reached $20 billion. Although there are comparative papers in the literature regarding the motor topologies used in e-mobility vehicles with greater power and speed, in terms of parameters such as efficiency, torque and power density, size, cost, torque vibration, controllability and technological saturation, the motor used in micro-mobility vehicles there is no such investigation papers regarding the motors. In this paper, the advantages and disadvantages of the motor topologies suitable for the operating requirements of micro-mobility vehicles and e-bike have been listed. In addition to the permanent magnet motor topologies recommended in the literature and frequently used commercially, such as brushless DC motor (BLDC) and permanent magnet synchronous motor (PMSM), switched reluctance motor (ARM) and induction motor (IM) have also been examined under the same operating conditions. According to the selected comparison criteria, performance evaluations of the relevant topologies have been made in the conclusion section. The findings obtained may shed light on the researchers who will start working in the field, and also provide the novel ideas for the motor design and improvement approaches.

Keywords: BLDC motor, Induction motor, Micromobility, PMSM motor, Switched reluctance motor.

I. GİRİŞ

Genelde bir ya da birden fazla kişinin şehir içinde kısa mesafeler arasında yürüme hızından daha hızlı şekilde hareketini sağlayan ulaşım araçlarına mikromobilite denir. Artan nüfus, şehirleşme ve yaşam temposu şehir içi ulaşım tercihlerini etkilemiştir. Bu tercihteki bir diğer önemli etken yaşadığımız pandemi süreci ve sosyal mesafenin öne çıkması olmuştur [7]. Bireysel kullanımda geleneksel bisikletlerin şehir içi sürücü temposuyla kullanılması zorlaşınca elektrikli bisikletler ve skuter'lar hızla yaygınlaşmıştır. Bu artışı tetikleyen bir başka etken de paylaşımlı kullanımlar olmuştur. Avrupa şehirlerindeki elektrikli iki tekerlekli araç kullanımı çoğunlukla paylaşımlı kiralama ile yapılmaktadır. Paylaşımlı mikromobilite pazarı, otomobil paylaşım pazarına göre iki, üç kat daha hızlı gelişmektedir [5]. Ülkemizde hem üretim hem de kullanım olarak mikromobilite araç teknolojisi hızla gelişmektedir. Bu gerçeklerle Türkiye 2030 yılında mikromobilite alanında geliştirilen çözümler ile dünya sıralamasında ilk 5'te olmayı hedeflemektedir [5].

Mikromobilite araçların mekanik ve şase aksam iyileştirmelerinin yanı sıra tahrik motoru ve batarya teknolojisi de kritik önemdedir. Bataryaları kurşun bazlı, nikel bazlı ve lityum bazlı olarak sınıflandırabiliriz. Bu bataryalar içerisinde genelde lityum bazlı bataryalar yüksek enerji yoğunluğu, (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve ideal çalışma sıcaklığı (-20°C - 60°C) gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler [6]. Mikromobilite aracın ağırlık ve taşıma kapasitesi ve istenen güç ve menzil değerlerine göre batarya paketi belirlenir.

Mobilite araçlar genelde 100 km ve üzeri menzillerdeki üç veya daha fazla kişinin ulaşımında kullanılan, şehir içi trafikte hız limitleri 50 km ve üzeri olan araçlardır. Bu araçlarda kullanılan elektrik motor tipleri ile ilgili literatürde pek çok karşılaştırmalı inceleme yapılmıştır. Tablo 1'de farklı motor tiplerini kullanan ticari ürünlerden bazıları ve özellikleri verilmiştir [8, 9]. Burada IM; Asenkron motoru, PMSM; Sürekli Mıknatıslı Senkron Motoru, BLDC; Fırçasız Doğru Akım Motoru, SRM; Anahtarlamalı Relüktans Motoru, WRSM; Rotoru Sargılı Senkron Motoru ifade etmektedir. Yüksek tahrik motor hızları redüktörler ile daha uygun hız değerlerine düşürülürken tork da arttırılır. Örneğin 18847 d/dk maksimum hıza sahip olan Tesla Model 3 motoruna 9.0361/1 oranında bir dişli sistemi bağlanmıştır ve 410 Nm'lik tork elde edilebilmektedir.

Tablo 1. Farklı motor tiplerini kullanan ticari e-mobilite araçlar ve özellikleri

Marka/Model	Model yılı	Motor tipi	Motor Gücü (kW)	Motor mak. Hızı (d/dk)
Tesla Model X	2015	IM	193-375	170000
NIO ES6	2020	PMSM	320	16500
HONDA e	2020	BLDC	100	5500
Land Rover	2013	SRM	70	6000
BMW iX M60	2022	WRSM	360	-

Mikromobilite araçlar, yüksek güç ve hızlarda çalışan mobilite araçlardan farklı isterlerde çalışırlar. Literatürde e-mobilite araçlardaki motor tiplerini karşılaştıran pek çok çalışma gözlemlenmiştir [10, 11]. Ancak 2 ve 3 tekerlekli e-bisiklet ve e-skuter gibi mikromobilite araçlardaki itki motor tip uygulamaları daha önce incelenmemiştir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde mikromobilite araçların tahrik sistemi incelenmiş ve çalışma koşulları ve ihtiyaçlar ortaya konulmuştur. Üçüncü bölümde e-mobilite araçlarda kullanılan tahrik motorları, bu çalışma koşulları dikkate alınarak tanıtılmıştır. İncelenen motorların performans karşılaştırmaları dördüncü bölümde yapılmıştır. Tartışma ve çıkarım bölümünde çalışmanın sonuçları, gelecekteki çalışma konuları ve araştırmacılara tavsiyelere yer verilmiştir.

II. MİKROMOBİLİTE TAHRİK İSTERLERİ

İki tekerlekli ve elektrikli mikromobilite araçlarda, yaygın şekilde tekerlek içi doğrudan tahrikli ve rotoru dışarıda motorlar tercih edilmektedir. 25 km/sa hız sınırı ve tekerlek ölçüleri dikkate alındığında tahrik motorunun düşük hız ve yüksek tork modu için kutup sayısının yüksek olması gerekir. Üç ve dört tekerlekli mikromobilite araçlarında tekerlek içi doğrudan tahrik uygulamasının yanında aks sistemine dişi ile de bağlantı yapılabilir. Bu elektrikli mikromobilite araçları 25 km/sa veya 45 km/sa hız sınırlarında olabilmektedir. Seçilen dişli oranı (1/8 gibi) ve araç hız limitine bağlı olarak, tekerlek ölçülerine göre tahrik motorunun hızı 3000-4800 d/dk arasında olabilmektedir. Bu motorlarda kutup sayısının düşük olması gerekir. Dişli ile mil arasında mekanik bağlantıyı sağlayabilmek için rotoru içeride motorlar tercih edilirler. Bu motorlarda tekerlek içine sığma gibi boyut kısıtları olmadığından, atalet torku ve üretim kolaylıkları açısından çapları küçük ve boyları uzun olabilmektedirler.

Mikromobilte araçları kısa mesafelerde bir veya birkaç kişinin taşınmasını sağlayan hafif araçlardır. Elektrikli mikromobilite araçların tek şarj ile gidecekleri menzil 30-130 km arasında olabilmektedir.

Menzil artışı doğrudan batarya kapasitesine bağlıdır. Batarya kapasitesi arttıkça araç ağırlığı da artacağından mikromobilitenin pratik olma özelliği azalır. Ayrıca ağırlık artışıyla, ihtiyaç duyulan kalkış torku ve akım değerleri de artar. Bu nedenle batarya kapasitesi dikkatli seçilmelidir. Mobilite araçlarda 400V hatta 1000 V gibi çalışma gerilimleri vardır. Günümüzde elektrikli araçlarda ağırlıklı olarak lityum batarya modelleri kullanılmaktadır ve gerilim seviyesi arttıkça seri bağlı batarya hücre sayısı ve dolayısıyla batarya paket boyu artar. Mikromobilite araçlarda, gerilim seviyeleri 36-72 V aralığındadır [12]. Bu nedenle tahrik motorunun bu gerilim seviyelerinde çalışabilmesi gerekmektedir.

III. TAHRİK MOTORLARI

Elektrikli motor ve tahrik sistemleri, içten yanmalı motorlar ve güç aktarım sistemine göre verimlilik ve karbon emisyonu açısından üstündür. Ayrıca ses, titreşim, kontrol edilebilirlik, bakım gereksinimleri vb. sürücü dostu artılar da yadsınamaz. Elektrikli tahrik sistemlerinde kullanılan motorları mıknatıslı ve mıknatıssız olarak sınıflandırabiliriz. Mıknatıslı motorlar güç, tork yoğunluğu ve verim açısından üstündür. Ancak nadir toprak element kaynağı olarak Çin'in neredeyse tek el olması, son yıllarda diğer ülkelerdeki motor üreticilerini mıknatıssız tahrik motorlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yönlendirmektedir. Bu nedenle elektrikli araç üreticileri farklı motor topolojilerini kullanmakta ve test etmektedir. Bu çalışmada elektrikli tahrik motorlarında yaygın şekilde kullanılan topolojiler ele alınmıştır.

A. BLDC motorlar

BLDC motorlar özellikle düşük hız yüksek tork gerektiren elektrikli bisiklet uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kişisel kullanımlı küçük taşıtların da yaygınlaşması ile birlikte BLDC motor piyasası da hızla büyümüştür. [1]'e göre BLDC motorun küresel pazarı büyüklüğü 2020 yılında 9.6 milyar $ dan 2025 yılında 15.2 milyar $'a çıkması beklenmektedir. Komütasyonun elektronik olarak gerçekleştirildiği BLDC motorda sabit kutup akısı bulunmaktadır. Bu nedenle birim güç faktöründe çalışırlar.

Yüksek tork yoğunluğu ve yüksek verimleriyle dikkat çeken BLDC motorların mıknatıs kutuplu DC motorlardan tek farkı fırçasız olmaları değildir. DC motorlarda bulunan kollektör dilimleri nedeniyle fiziksel komütasyon sağlanmaktadır. Bu nedenle de doğrudan besleme ile birlikte çalışabilirler. Ancak BLDC motorlarda düzgün bir çalışma için elektronik komütasyonun iyi yapılması gerekir. Bu nedenle rotor konumuna bağlı olarak endüvi sargılarına gerilim uygulanmalıdır. DC motorlarda çok fazla endüvi sargısı olduğundan fırça uçlarında oldukça düzgün bir zıt emk gerilimi görülür. BLDC motorlarda ise genelde 3 fazlı endüvi sargıları olduğundan zıt emk gerilimi oldukça dalgalıdır. Bu nedenle faz akımları ve üretilen torkta da bu dalgalanmalar görülür.

BLDC motorun elektronik komütasyonu için rotor konumuna bağlı olarak endüvi faz sargılarını enerjilendiren bir sürücü gerekir. BLDC motor, sürücü doğru çalıştığı sürece çalıştırılabilir. Rotor konumu; hall etkili sensörler veya enkoder ile elde edilebileceği gibi enerjilendirilmeyen faz sargılarındaki zıt-emk'ın ölçümü ile sensörsüz olarak da tespit edilebilir. BLDC motorlarda yüzey yerleştirmeli rotor yapısı vardır. Şekil 1'de rotoru dışarıda bir BLDC motorun stator ve rotoru görülmektedir.



Şekil. 1 Rotoru dışarda BLDC motor yapısı

B. SRM motorlar

Anahtarlamalı relüktans motorlarda mıknatıssız ve sağlam rotor yapıları ile öne çıkmaktadır. Stator ve rotor çekirdeklerinin üretimi kolaydır. Mıknatıssız ve sargısız bir rotora sahip olduklarından yüksek hızlarda ve sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Şekil 2'de 12/8 oluk-kutup kombinasyonlu 3 fazlı bir SRM'in yapısı görülmektedir. Çok fazlı bir SRM'de relüktans farkı oluşturabilmek için stator oluk sayısı ile rotor kutup sayısının birbirinden farklı olması gerekir. Her konum değişiminde bir faz sargısı enerjilendirilir. Relüktans farkı nedeniyle oluşan relüktans tork ile adım motoru gibi çalışırlar. Faz sargıları rotor

konumuna ve dönüş yönüne göre sırasıyla enerjilendirilerek döner alan oluşturulur. Tork salınımını azaltmak için üçten daha fazla sayıda faz sargısı da olabilir. Tork salınımlarının yüksek olması, sürücü devrelerinin maliyetli olması gibi sakıncaları vardır.



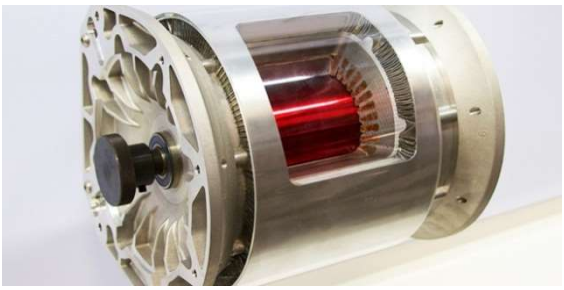
Şekil. 2 12/8 SRM motor yapısı [13]

C. İndüksiyon motorları

İndüksiyon motorları basit ve sağlam yapıları ile endüstriyel uygulamaların büyük çoğunluğunda kullanılmaktadır. İndüksiyon motorlarının statorlarında döner alan oluşturan dağıtılmış tip stator sargıları bulunur. Dönen kısımda ise bu döner alandan etkilen ve elektriksel olarak kısa devre olan rotor vardır. Rotor yapısına göre sincap kafesli veya rotoru sargılı şekilde olabilir. Basit ve kompakt yapısı nedeniyle sincap kafesli rotor yapısı daha çok tercih edilir. Elektrikli araçlarda tercih edildiği ticari modeller de vardır [3]. Şekil 3'de Tesla Model S60'da kullanılan indüksiyon motorunun kesiti verilmiştir. Bu motorun sincap kafesli rotorunda, iletkenliği daha yüksek olan bakır çubuklar kullanılmıştır. Statordaki döner alanın rotor kısa devre çubuklarında indüklediği gerilim ile rotor manyetik alanı oluşturulur. Bu nedenle senkron hıza yakın ve altında hızlarda çalışırlar.

Ticari indüksiyon motorlarının senkron hızları kutup sayısına bağlı olarak 1500 ve 3000 d/dk gibi hızlardır. IM'nin mikromobilite araçlardaki düşük hız-yüksek tork uygulaması için, doğrudan tahrikli olarak çalıştırılması mümkün değildir. İndüksiyon motorlarında 3 fazlı sargıların oluk yerleşimleri ile kutuplar oluşturulmaktadır. Bu nedenle 6-8 kutuplu bir indüksiyon motoru elde edilebilir, ancak yüksek kutup sayıları için yüksek oluk sayılı stator nüvesine ihtiyaç vardır. Akım yoğunluğu ve olası oluk alanı düşünüldüğünde, oluk sayısını arttırmak için stator çapının ve dolayısıyla da motor çapının çok artması gerekir. Dişli kutusu ile birlikte kullanımı ise ilave ses kaynağı ve bakım gereksinimi getireceğinden indüksiyon motor kullanmanın getirdiği basitliği ortadan kaldıracaktır. Eğer 16 kutuplu bir indüksiyon motoru tercih edilirse, 50 Hz'de senkron hızı 375 d/dk olacaktır (1). [2]'de düşük hızlı bir rüzgar türbini için çok kutuplu indüksiyon generatör çalışması yapılmıştır. Bunun haricinde literatürde bir uygulamaya rastlanmamıştır. Kutup sayısı daha düşük olan bir indüksiyon motorunda motor sürücü ile düşük hız çalışması sağlanabilir. Ancak düşük çalışma frekanslarında statordaki manyetik doyumlar dikkate alınmalıdır. Böyle bir çalışma literatürde mevcut değildir.

$$n_s = \frac{120*\mathrm{f}}{\mathrm{P}} \tag{1}$$

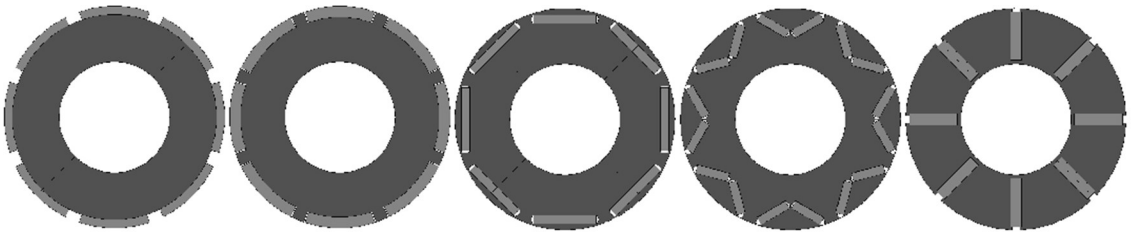


Şekil. 3 Tesla Model s60 motor kesiti

D. PMSM motorlar

PMSM motorlar da indüksiyon motorları gibi dönen manyetik alan kullanırlar. Bu nedenle stator yapıları ve sargı sürücüleri benzerdir. İndüksiyon motorlarından farkı ise senkron hızda çalışmalarıdır.

Mıknatıslı rotorlarındaki olası farklı dizilimler literatürde açıklanmıştır. En yaygın kullanılan mıknatıs dizilimleri Şekil 4'de verilmiştir. PMSM makinenin faz sargılarında indüklenen gerilim sinüsoidaldir ve her adımda 3 faz sargısından da akım geçer. Bu özellikleri ile BLDC makinelerden farklıdırlar. Dağıtılmış sargı kullanımı ile bakır ağırlıkları BLDC makinelere göre daha fazladır. Buna karşılık gömülü tip mıknatıs dizilimleri ile daha yüksek hızlarda çalışabilirler ve farklı mıknatıs dizilimleri tasarımcılara büyük esneklik sağlar. Rotor konfigürasyonları ile sadece mıknatıs torku değil aynı zamanda relüktans torku da üretilebilir. Bu durumda BLDC'lere göre daha yüksek torklar elde edilebilir. Mıknatıs dizilimleriyle yüksek kutup sayıları elde edilebilmektedir [14].



Şekil. 4 Rotoru içeride PMSM'ler için yaygın mıknatıs dizilimleri [15]

IV. PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorları ile ilgili literatürde pek çok karşılaştırma yapılmıştır [16-19]. Bu karşılaştırmaların genellemesi Tablo 2'de 10 puan üzerinden verilmiştir. Değerlendirme puanı literatürdeki değerlendirmelerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. En çok karşılaştırılan kriter, verim ve fiyat olmuştur. Elbette mıknatıs kullanımı, motor fiyatını ciddi oranda etkilemektedir. BLDC motorlarda yay formundaki mıknatısların maliyeti, gömülü dikdörtgen mıknatıs kullanan PMSM'lere göre daha fazladır. Toplam değerlendirme olarak PMSM makineler en iyi ortalamayı yakalamıştır. BLDC motorlar da PMSM motorlara oldukça yakın bir değerlendirme göstermiştir. En düşük değerlendirme puanı SRM'e aittir. SRM motorların tork dalgalanmaları ve güç faktörleri, özellikle yüksek tork ve güç uygulamalarında dikkate alınmalıdır.

Tablo 2. Farklı motor topolojilerinin performans değerlendirmesi

Karşılaştırma Kriteri	**BLDC**	**IM**	**SRM**	**PMSM**
Verim	9,38	6,67	7,29	9,63
Güç Yoğunluğu	9,50	7,50	7,50	10,00
Kontrol	7,25	8,75	6,50	7,25
Gürültü	8,00	6,00	8,00	8,00
Fiyat	4,27	7,17	9,00	4,67
Teknolojik Gelişmişlik	8,00	10,00	8,00	8,00
Tork Titreşimi	9,00	10,00	3,33	10,00
Güç Faktörü	10,00	6,00	2,00	10,00
Kararlılık	6,00	10,00	9,00	6,00
TOPLAM	**8,044**	**8,009**	**6,736**	**8,171**

V. TARTIŞMA

Elektrikli mobilite araçlar için incelenen literatür çalışmaları, genelde 400V ve üzeri çalışma gerilimleri, ve 6000 d/dk ve daha yüksek hızları kapsamaktadır. Bu çalışmada ise 25 km/sa çalışma hızlarına sahip mikromobilite araçlardaki itki motorları incelenmiştir. Dişli aktarımlı tahrik kullanımı dişli bakımı ve arıza riski doğurduğundan doğrudan tahrikli bir güç aktarımı dikkate alınmıştır. Buna göre motor kutup sayısının yüksek olması ve çalışma hız değerlerinin düşük olması gerekir. Çalışma gerilim seviyeleri de dikkate alınarak yapılan karşılaştırma sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Puanlama yine 10 üzerinden yapılmıştır.

Mıknatıs kullanımı güç yoğunluğunu arttırmaktadır. IM'de için çok kutuplu tasarım, motor boyutları ve oluk alanı dikkate alındığında, sarım açısından çok zordur. Ayrıca IM'in rotoru dışarıda olan ticari modelleri de görülmemiştir. IM'in en önemli üstünlüğü mıknatıs kullanılmadığı için maliyeti ve tork titreşiminin az olmasıdır. SRM motorların güç yoğunlukları ve güç faktörleri düşüktür. Bu durum, sürücü ve batarya boyutlarının ve maliyetinin artması sonucunu doğurur. Ayrıca tork titreşimleri de fazladır. PMSM ve BLDC motor benzer performansları göstermektedirler. PMSM'de genelde dikdörtgen mıknatıslar kullanıldığından maliyetler daha azdır. Buna karşılık gömülü mıknatıs dizilimleri, rotoru dışarıda

uygulama için sınırlıdır. BLDC motorlardaki zıt-emk dalgalanması nedeniyle tork titreşimi fazladır. IM, ve PMSM'de döner alan oluşturmak için her faz sargısının sürekli enerjili olduğu bir üç fazlı sürücü gerekir. SRM'de faz sayısı daha fazla da olabilmektedir. BLDC'de ise her adımda iki faz sargısı enerjili olacak şekilde bir çalışma vardır. 3 faz sargısının da enerjili olduğu sürücü algoritmaları daha karmaşıktır.

Tablo3. Mikromobilite özelinde performans değerlendirmesi

Karşılaştırma Kriteri	BLDC	IM	SRM	PMSM
Verim	10	6	8	10
Güç Yoğunluğu	10	6	6	10
Doğrudan Tahrik	10	6	10	10
Yüksek çap/boy oranı	8	6	8	8
Fiyat	7	10	10	8
Rotoru dışarıda kullanımı	10	2	10	9
Tork Titreşimi	8	10	4	9
Güç Faktörü	10	8	4	10
Kontrol kolaylığı	9	6	6	6
TOPLAM	**9,111**	**6,667**	**7,334**	**8,888**

VI. ÇIKARIM

Bu çalışmada dikkate alınan karşılaştırma kriterleri açısından iki tekerlekli mikromobilite araçları ve elektrikli bisikletler için, doğrudan tahrikli tekerlek içi (hub) motor uygulaması ve motor olarak da BLDC motorun seçimi en uygun seçenek olarak görülmüştür. PMSM motorun da sürücü karmaşıklığı dışında BLDC ile rekabet edebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Mobilite araçlarda uygulaması olan IM'in rotoru dışarıda uygulamasının olmaması, mikromobilite uygulaması için önemli eksiklikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Mıknatıssız itki motoru olarak SRM de mikromobilite araçlarda uygun sürücü ile birlikte kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] D. Mohanraj et al., "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833-54869, 2022.

[2] G. Madescu, A. Trica, N. Budisan, O. Prostean, M. Biriescu, and M. Mot, "Performance optimization of low-speed induction generators for direct drive wind turbines". *In 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference,* pp. 166-171, 2007.

[3] K.K. Tae, H.E. Song, and G.S. Park. "A study on the design of induction motor in low speed urban electric vehicle." 2*016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, *Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. pp. 866-869, 2016.

[4] Sandesh, Bhaktha B., et al. "Design and optimization of an external-rotor switched reluctance motor for an electric scooter." *Materials Today: Proceedings (2023).*

[5] *Mobilite araç teknolojileri Yol haritası-2022* www.sanayi.gov.tr

[6] M.Y. Kaba, O. Kaplan ve A. CELEN. "ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ." *Konya Journal of Engineering Sciences* vol 9(4), pp. 1119-1136, 2021.

[7] H. Önder, and F. Akdemir. "Sürdürülebilir Ulaşım Altyapısının Pandemi Döneminde Yeniden Kurgulanması: Mikromobilite Trendleri ve Türkiye." *İdealkent* 13(36), pp.748-770, 2022.

[8] S. Thangavel, M. Deepak, T. Girijaprasanna, S. Raju, C. Dhanamjayulu, ve S.M. Muyeen, "A comprehensive review on electric vehicle: battery management system, charging station, traction motors". *IEEE Access*, 2023.

[9] https://www.greencarcongress.com/2022/01/20220105-ix60.html

[10] H.E. Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak, O. Laayati, ve N. Guennouni, "A multi-criteria analysis and trends of electric motors for electric vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, 13(4), 65, 2022.

[11] J.D. Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, M. Leijon, "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review," *IEEE Transactions on vehicular technology,* 61(2), pp: 475-484, 2011.

[12] https://volta.com.tr/modeller/

[13] E.F.I. Raj, M. Appadurai, E.F.I. Rani, ve I. Jenish, "Finite-element design and analysis of switched reluctance motor for automobile applications." *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 5(3), pp:269-277, 2022.

[14] Y. Yang, M.M. Rahman, T. Lambert, B. Bilgin, ve A. Emadi, "Development of an external rotor V-shape permanent magnet machine for E-bike application." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(4), pp: 1650-1658, 2018.

[15] T. Finken, M. Hombitzer, ve K. Hameyer, "Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles." 2010 Emobility-Electrical Power Train. IEEE, 2010.

[16] H. Ahmed. "A Comparative Study on Different Motors used in Electric Vehicles." *Journal of Independent Studies and Research Computing*, 20(2), 2022.

[17] M. Yildirim, M. Polat, ve H. Kürüm, "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles." *In 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition,* pp. 218-223, 2014.

[18] S. Cai, J.L. Kirtley, ve C.H. Lee, "Critical review of direct-drive electrical machine systems for electric and hybrid electric vehicles." *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 2022.

[19] S. Nategh, A. Boglietti, Y. Liu, D. Barber, R. Brammer, D. Lindberg, ve O. Aglen, "A review on different aspects of traction motor design for railway applications." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), pp: 2148-2157, 2020.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Ekotoksisite Testlerinin Son Noktasını Belirlemede Alternatif Matematiksel Yaklaşım

V. Zülal Sönmez[a], Nevra Ercan[b], Melek Cumbul Altay[c], Ceyhun Akarsu[d], Nüket Sivri[d]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[c]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji-Malzeme Mühendisliği, İstanbul/Türkiye.
[d]İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: zulalsonmez@duzce.edu.tr

ÖZET

Ekotoksikolojide, kirleticilerin toksisitelerini ve toksikolojik etkileşimlerini belirlemek için doz-etki ilişkilerini tespit etmek önemlidir. Kuvvet Yasası, Probit, Logit ve Kütle Hareketi Yasası'nın Medyan Etki Denklemi gibi denklemler, doz-etki ilişkisini anlamak için kullanılan modeller arasındadır. Medyan etki denkleminden türetilen CompuSyn yazılımı, farmasötik alanda ilaçların bireysel toksisiteleri ve kombinasyon indeksi hesaplamalarında oldukça popülerdir. Bu çalışmanın amacı, ekotoksikolojide sıklıkla tercih edilen bir biyotestin sonuçlarını belirlemede geleneksel matematiksel yaklaşım ile CompuSyn yazılımını karşılaştırmaktır. Bu kapsamda, diğer ekotoksikoloji testlerine göre hızlıca sonuç alınabilen ve hassas bir organizma olan *Aliivibrio fischeri* bakteri aracılığıyla yürütülen biyolümünesans bakteri ile akut toksisite testinden yararlanılmıştır. Çevresel kirleticilerden olan kurşun (Pb^{+2}) ve gümüş (Ag^{+}) metalleri ile hazırlanan çözeltilerin 30. dakika sonundaki biyolüminesans inhibisyon oranları kaydedilmiştir. Microtox® M500 Omni Software göre Pb^{+2} ve Ag^{+} sonuçları sırasıyla 0,480 mg/L ve 11,870 mg/L bulunurken, CompuSyn göre; Pb^{+2} ve Ag^{+} sonuçları sırasıyla 1,245 mg/L ve 15,280 mg/L olarak bulunmuştur. Farklı bir toksikoloji alt disiplininde kullanılan alternatif matematiksel yaklaşımlar, ekotoksikoloji testlerinin sonucuna daha etkili bir şekilde ulaşmada önemli bir rol oynayabilir. Özellikle çevresel ortamlarda tek başına yerine birden fazla kirleticinin bir arada olma durumu değerlendirildiğinde, CompuSyn kirleticilerin toksikolojik etkileşimlerini kolayca belirlemede alternatif bir matematiksel yaklaşım olarak düşünülebilir.

Anahtar Kelimeler: *Aliivibrio fischeri, CompuSyn, EC_{50}, metaller, Microtox®.*

Alternative Mathematical Approach in Determining the Endpoint of Ecotoxicity Tests

V. Zülal Sönmez[a],Nevra Ercan[b], Melek Cumbul Altay[c], Ceyhun Akarsu[d], Nüket Sivri[d]*

[a]Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Düzce/Turkey.
[b]Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Istanbul/Turkey.
[c]Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul/Turkey.
[d]Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Istanbul/Turkey.
*Corresponding author: zulalsonmez@duzce.edu.tr

ABSTRACT

In ecotoxicology, it is of crucial importance to determine the toxicity and toxicological interactions of pollutants by demonstrating dose-response relationships. Equations such as the Power Law, Probit, Logit and the Law of Mass Action, including the Median Effect Equation, are among the models frequently used to understand dose-response relationships. The CompuSyn software derived from the Median Effect Equation, is widely used in the pharmaceutical field to calculate the toxicity of individual drugs and to evaluate combination indexes. The aim of this study is to compare the results of a frequently favored biotest in ecotoxicology using traditional mathematical approaches and the CompuSyn software. In this context, the

bioluminescent bacterial test with the sensitive organism *Aliivibrio fischeri* has been used, which provides rapid results compared to other ecotoxicological tests. Solutions prepared with environmental pollutants, lead (Pb^{2+}) and silver (Ag^{+}), were tested in an acute toxicity test and the bioluminescence inhibition rates were recorded after 30 minutes. According to Microtox® M500 Omni Software, the results for Pb^{2+} and Ag^{+} were 0.480 mg/L and 11.870 mg/L, respectively, while according to CompuSyn, the results for Pb^{2+} and Ag^{+} were 01.245 mg/L and 15.280 mg/L, respectively. Alternative mathematical approaches used in another sub-discipline of toxicology can play an important role in achieving more effective results in ecotoxicological testing. In particular, when assessing situations where multiple pollutants coexist in the environment, CompuSyn can be considered as an alternative mathematical approach to easily determine the toxicological interactions of pollutants.

Keywords: *Aliivibrio fischeri, CompuSyn, EC_{50}, metals, Microtox® .*

I. Introduction

With the rapid progress of industry, pollutants are becoming more complex by the day. Their impact on aquatic ecosystems goes beyond more physicochemical changes and includes biological and toxicological effects. The direct discharge of wastewater into the receiving environment, either directly or due to inadequate treatment, mainly results in pollutants with known toxicity, such as metals, entering directly into the receiving environment [1].

The potential effects of pollutants, especially metals, on organisms in aquatic ecosystems cannot be adequately determined by physical and chemical analyses alone. Therefore, ecotoxicity tests are used to assess toxicity. The basic principle underlying all these ecotoxicity tests is the response of living organisms exposed to a toxic substance as a function of the dose of the substance. The effect that occurs shortly after a single dose of pollutant intake and is characterized by sudden symptoms is called acute toxicity. In contrast, chronic toxicity is characterized by organisms being exposed to the same effect for more than 3 months, either continuously or at certain intervals [2].

For ecotoxicological assessments, it is crucial to understand the dose-response relationship of pollutants and to determine their potential effects on organisms in the ecosystem concerned at specific concentrations. In ecotoxicity tests, identifying the lowest concentration at which death or an effect is observed and the concentration at which no effect is observed is critical to determining the dose-response relationship. For the organisms used in toxicity tests, the concentration required to cause death in half the population is referred to as the median lethal concentration (LC_{50}), while the concentration required to affect half the population (e.g. stroke, loss of balance, decrease in bioluminescence) is referred to as the median effective concentration (EC_{50}).

Various models are used to analyze the results of ecotoxicity tests. These models include equations such as the Law of Potency, Probit, Logit, and the Median Effect Equation of Mass Action. The CompuSyn software, developed by Ting-Chao Chou based on the median effect equation, is used for drug combinations and general dose-response analyses [3]. This software is widely used in the pharmaceutical field to calculate the individual toxicities of drugs and combination indices.

The bioluminescent bacteria (*Aliivibrio fischeri*) is one of the organisms that have recently been favored in ecotoxicity tests. This test is based on the principle of measuring the decrease in luminescence emitted by bioluminescent bacteria when exposed to a toxic chemical/pollutant. Toxicity tests with bioluminescent bacteria require an analyzer to measure the luminescence emitted by the organisms. Commercially available analyzers include devices such as Microtox® , Biotox®, LumisTox® and ToxAlert®. In addition to measuring luminescence, performing the test also provides the result of the ecotoxicity test via the software provided by Microtox® [4].

The aim of this study is to compare the results of a frequently preferred biotest in ecotoxicology using traditional mathematical approaches and the CompuSyn software. In this context, the bioluminescent bacterial test with the sensitive organism *A. fischeri* has been used, which provides rapid results compared to other ecotoxicological tests. Solutions prepared with environmental pollutants, lead (Pb^{2+}) and silver (Ag^{+}), were tested in an acute toxicity test. Alternative mathematical approaches used in another sub-discipline of toxicology can play an important role in obtaining more effective results in ecotoxicological tests.

II. Materials and Methods

In the research design designed following the purpose of the study, two metals were tested: Ag^{+} ($AgNO_3$) and Pb^{2+} ($Pb(NO_3)_2$). Lead (Pb) toxicity is a subject of interest for environmental scientists due to its toxic effect on plants, animals, and humans. An increase in several Pb-related industrial activities and the use of Pb-containing products such as agrochemicals, oil and paint, mining, etc. can lead to Pb contamination in

the environment and thereby, can enter the food chain [5]. Pb contamination in air, soil, and water resources has been associated with natural causes, such as geochemical weathering, sea spray emissions, volcanic activity, and remobilization of sediment, soil, and water from mining areas [6]. Silver (Ag), a naturally occurring, rare, and precious metal, also enters the environment by manufacturing and using Ag compounds in electroplating and photography, catalysts, medical devices, and batteries. Silver and its compounds are toxic, and humans and other animals are exposed to Ag through inhalation of air and the consumption of Ag-contaminated food and drinking water. Remediation of Ag-contaminated soil and water sources can be achieved through immobilization and mobilization processes [7]. Silver, one of the most toxic forms of heavy metals, has been assigned to the highest toxicity class of contaminants, along with cadmium, mercury, chromium, lead, and copper [8]. Although metal-mixture toxicity has recently received increasing attention, there is still insufficient knowledge on joint effects occurring in chronic exposures to relatively low metal concentrations [9].

In this study, all metal concentrations were prepared with metallic salts. Toxicity was tested at increasing concentrations of the metal ion. Concentrated stock solutions (250 ppm) were prepared by dissolving the salts in deionized water and stored individually in the dark at 4°C until use. The chemical solutions were accurately adjusted to the desired pH (6.0 - 7.0) prior to analysis. The ecotoxicity of each metal solution was tested using the *A. fischeri* with Acute Toxicity Test. The raw data obtained was used to determine the median effective concentration (EC_{50}) using Microtox® Omni Software and CompuSyn Software.

A. Aliivibrio fischeri with Acute Toxicity Test

Acute toxicity tests with *A. fischeri* provide reliable results for the assessment of pollutants with regard to their ecotoxicity. The Microtox® M500 Analyzer was used for the measurements, following the manufacturer's Microtox® Basic Test protocol [10,11]. *A. fischeri* bacteria with a culture of 10^8 bacteria/vial (NRRL B-11177), purchased from SDI Europe (Hampshire, UK). The test solutions were prepared at different dilution ratios with 500 µl of the sample in a 2% NaCl solution. To these prepared mixtures, 10 µl of an *A. fischeri* culture was added. The tests were performed at 15°C. Negative controls (2% NaCl solution) and positive controls (formaldehyde [11]) were used in the tests to monitor the activity of *A. fischeri*. The intensity of luminescence emitted by *A. fischeri* was measured with the Microtox® M500 Analyzer after an exposure time of 30 minutes.

B. Microtox® Omni Software

According to the method, the measurement is made by comparing the luminescence of the bioluminescent bacteria after exposure to the toxic substance (sample) with the luminescence of the 2% NaCl solution without the sample (control). The difference in luminescence values between the control and the sample is based on the effect of the sample on the organism (Eq. 1 and Eq. 2)

$$BRt = \frac{I[0]t}{I[0]0} \quad (1)$$

$$I' = \frac{BRt\ x\ I[C]0 - I[C]t}{I[C]t} \quad (2)$$

$I[0]_0$ and $I[0]_t$ represent the luminescence values of the bioluminescent bacteria in the control sample at 0 (initial) time and time t, respectively. Similarly, $I[C]_0$ and $I[C]_t$ values indicate the luminescence values of the bioluminescent bacteria in the control sample at 0 (initial) time before exposure and at time t after exposure to the sample, respectively [10].

C. CompuSyn Software

The software is introduced by Chou [12] as the median effect principle. This basic approach differs from the empirical-statistical approach, although statistics are often used to analyze final results, including probability, variability, correlation and significance estimation. In this method, dose-response curves are drawn for each substance and their combinations at several diluted concentrations using the median effect equation:

$$\frac{f_a}{f_u} = \left(\frac{D}{D_m}\right)^m \quad (3)$$

This method can be considered as a fractional analysis technique for drug interactions independent of the mode of action. By considering the potency (EC_{50}, Dm) and shape (m) of the dose-response curve for each chemical, the method allows for a fractional analysis of drug interactions. Here, fa (e.g., 0.5 if cell

bioluminescence is inhibited by 50%) and fu (therefore, fa = 1 - fu) represent the fractions affected and unaffected, respectively [12].

III. Results

The bioluminescence inhibition rates of *A. fischeri* after a 30-minute exposure to Pb^{2+} and Ag^{+} metals are shown in Figure 1. The bioluminescence inhibition rates (fa) were indicated according to the concentrations of both metals. It was also found that the bioluminescence inhibition rate of Pb^{2+} on *A. fischeri* (fa=0.5) was almost twice as high as that of Ag^{+} (fa=0.9).

According to the CompuSyn software, effective concentrations (EC_{50}, EC_{75}, and EC_{90}) for Pb^{2+} and Ag^{+} were provided in Table 1. The average effective concentration value, denoted as EC_{50} or D_m, closely approaches one for both metals, with r values approximately equal to 0.937 for Pb^{2+} and 0.998 for Ag^{+}. The EC_{50} values for Pb^{2+} and Ag^{+} on *A. fischeri* were found to be 1.245 mg/L and 15.280 mg/L, respectively. While for Ag^{+}, a concentration above 100 mg/L is required for 90% inhibition of *A. fischeri*, this value was found to be 10 mg/L for Pb^{2+}.

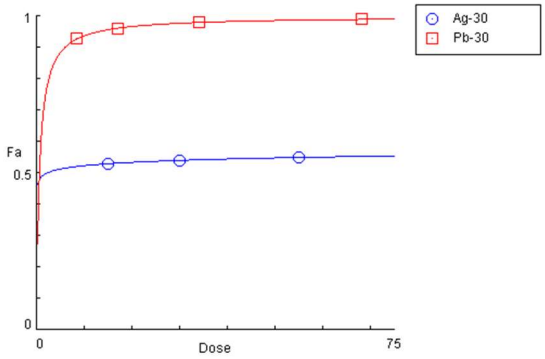
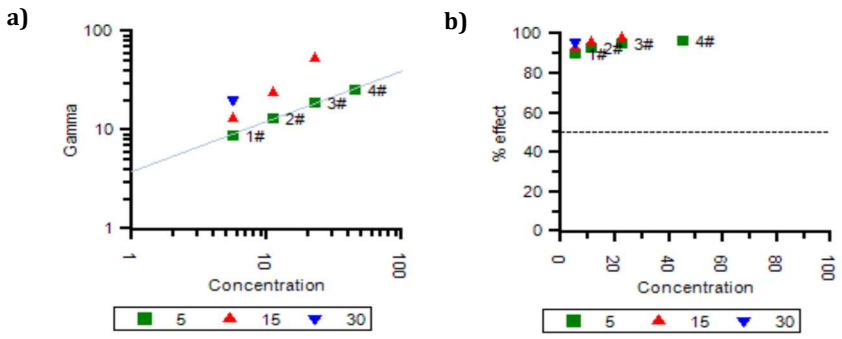


Figure 1: Bioluminescence inhibition rates (fa) corresponding to concentrations of Pb^{2+} and Ag^{+} (CompuSyn software output)

Table 1: EC_{50} values exposure of A. *fischeri* bacteria to metals (CompuSyn software output)

Metal	Dose-Effect parameters			EC		
	Dm	m	r	EC_{50}	EC_{75}	EC_{90}
Pb^{2+}	1.245	1.022	0.998	1.245	3.647	10.681
Ag^{+}	15.280	0.340	0.937	15.280	>100	>100

According to the Microtox® Omni Software, the endpoints of toxicity of Pb^{2+} and Ag^{+} metals on *A. fischeri* were presented in Figure 3. Figure 3-a and 3-c represent the values measured by the analyzer for the gamma rays emitted by the organism against metal concentrations while Figure 3-b and 3-d represent the percentage effect on the organism corresponding to different concentrations of metals. The results from the Microtox® M500 Omni Software indicate that Pb^{2+} was found to be 0.48 mg/L, while Ag^{+} was found to be 11.87 mg/L.



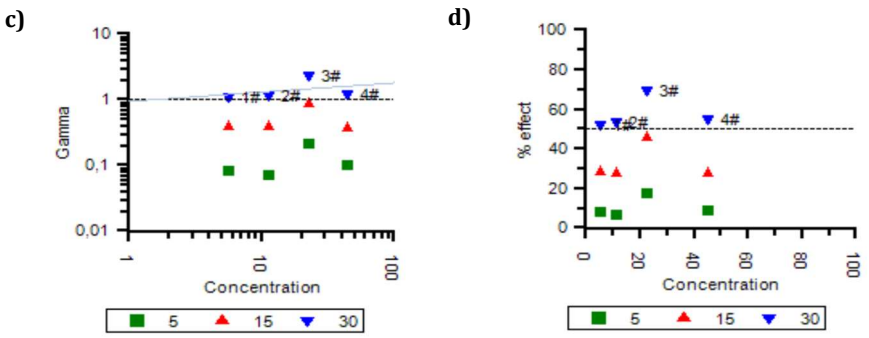


Figure 3: The gamma and effect ratios corresponding to the concentrations of Pb^{2+} (a and b) and Ag^{+} (c and d) (Microtox® Omni software outputs).

IV. Discussion

In ecotoxicity tests, the lower the final value, the higher the toxicity. There is an inverse relationship between the absolute numerical value of the test endpoint and the toxicity level. A comparison of the results of the two software programs shows that both metals are toxic, with Pb^{2+} having a higher toxicity than Ag^{+}.

The studies on the two metal ions - Pb^{2+} and Ag^{+}, which were measured with the Microtox® analyzer and their EC_{50} values calculated, are listed in Table 2. For Pb^{2+} the values were between 0.12 mg/L and 2.24 mg/L. These values are within this range according to the results of both software. A similar situation was also observed for Ag^{+}. However, depending on the concentrations of the analyzed metals, the EC_{50} range for the metal Ag+ was wider. The results suggest that the acute toxicity of *A. fischeri* bacteria assessed with the CompuSyn program could serve as an alternative method in environmental toxicology, apart from its conventional use in biomedicine and pharmacology.

Table 2: EC_{50} values exposure of *A. fischeri* bacteria to metals according to the Microtox® protocol

Metal	EC_{50} (mg/L)	Reference
Pb^{2+}	0.12	Fulladosa et al. [13]
	0.13	Villaescusa et al. [14]
	0.17	Newman and McCloskey [15]
	0.22	Villaescusa et al. [16]
	0.46	Ishaque et al. [17]
	2.24	McCloskey et al. [18]
Ag^{+}	0.46	Rosen et al. [19]
	7.92	Hsieh et al. [20]
	15.89	Binaeian et al. [21]

The values calculated in the CompuSyn software are numerically greater than the values calculated in the Microtox® Omni software; however, this discrepancy does not lead to a change in the degree of toxicity. The results obtained with the two different software programs are parallel to each other. However, further data sets are required for the statistical evaluation of the two programs.

In the literature, studies dealing with the use of the CompuSyn program in the “environmental sciences" are quite limited, according to the Scopus database. The studies that have been conducted have predominantly focused on the combination relationships of antibiotics, common in the pharmaceutical field, with the pollutant group "heavy metals" and different chemical structures excreted by different systems in the human bodies. In recent studies, Bae and Bae and Ariunzaya [21] focused on the combination effect of heavy metals and glutamate using the CompuSyn software, while Halloum et al [22] investigated the relationship between two heavy metals and the toxicity of amiodarone. The CompuSyn program can be used not only to determine the toxicity endpoints of individual chemicals, but also to determine the toxicological interactions of chemicals. In comparison to the CompuSyn software, the Microtox® Omni program is only suitable for determining the individual toxicity of chemicals.

V. CONCLUSION

Pollutants in ecosystems rarely exist in isolation; therefore, prioritizing the assessment of toxicological interactions allows for a more comprehensive and realistic understanding of environmental risks. The identification of chemical-toxicological interactions, such as synergistic, antagonistic, and additive effects, provides valuable insights into the complexity of pollutant interactions, particularly in aquatic environments where multiple pollutants co-occur. Various technologies can potentially treat heavy metals and toxic compounds in both liquid and solid forms. These include different methods such as adsorption, coagulation and filtration, cation exchange, electrodialysis, reverse osmosis filtration, physical fixation and vitrification, cement-based grouting and chemical fixation, bioremediation, and phytoremediation. However, as the circular waste management approach has become more important recently, scientific studies are focused on the idea of combining two or more technologies to recover valuable resources.

The reduction of dependence on specific devices or programs and the diversification of alternatives in bioassays represents a decisive step in technological progress in the field of ecotoxicology. With the support of the findings obtained in this study, the use of the CompuSyn program to calculate endpoints beyond the EC_{50} can play an important role in environmental risk decision-making. It is expected that this information will contribute to more effective development of environmental protection and management strategies.

REFERENCES

[1] V.Z. Sonmez, N. Sivri, A.H. Dokmeci. "Determination of the toxicity of different discharge waters using acute toxicity tests approved for national pollutant discharge permit in Turkey", *Biosciences Biotechnology Research* Asia, 13(2), 609-614, 2016.

[2] R. Samli, V Z., Sonmez, N. Sivri. "Modeling the toxicity of textile industry wastewater using artificial neural networks. In 2017 Electric Electronics, Computer Science", *Biomedical Engineerings' Meeting* (EBBT) (pp. 1-5). IEEE, 2017.

[3] T.C. Chou. "Theoretical Basis, Experimental Design, and Computerized Simulation of Synergism and Antagonism in Drug Combination Studies", *Pharmacological Reviews*, 58(3), 621–681, 2006.

[4] G.D. Değermenci. "Toxicity Testing Applied To Wastewater Treatment", *The Turkish Journal Of Occupational / Environmental Medicine and Safety*, 2(1), 243-243, 2017.

[5] A. Kumar, , A. Kumar, A.K. Chaturvedi, A.A. Shabnam, G. Subrahmanyam, K.K. Yadav. "*Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches*", International journal of environmental research and public health, 17(7), 2179, 2020.

[6] M.M. Cabral Pinto, E. A. Ferreira da Silva. "*Heavy Metals of Santiago Island (Cape Verde) alluvial deposits: Baseline value maps and human health risk assessment*", International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(1), 2, 2019.

[7] L. P. Padhye, T. Jasemizad, S. Bolan, O. V. Tsyusko, J. M. Unrine, B. K. Biswal,... & N. Bolan. "*Silver contamination and its toxicity and risk management in terrestrial and aquatic ecosystems*", Science of The Total Environment, 871, 161926, 2023.

[8] N. Gupta, K. K. Yadav, V. Kumar, S. Prasad, M. M. Cabral-Pinto, B. H. Jeon,... & A.K.D. Alsukaibia. "*Investigation of heavy metal accumulation in vegetables and health risk to humans from their consumption"*, Frontiers in Environmental Science, 10, 791052, 2022.

[9] A. Crémazy, K.V. Brix, C.M. Wood. "*Chronic toxicity of binary mixtures of six metals (Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn) to the great pond snail Lymnaea stagnalis*", Environmental science & technology, 52(10), 5979-5988, 2018.

[10] Microtox® ® Manual, 1992, Microbics Corporation, Carlsbad, USA.

[11] V. Z. Sönmez, N. Sivri. "Interlaboratory precision of acute toxicity tests using reference toxicant formaldehyde", *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 1(3), 96-99, 2016.

[12] T.C. Chou. "Derivation and properties of Michaelis-Menten type and Hill type equations for reference ligands", *J. Theor. Biol*., 59, 253-276, 1976.

[13] E., Fulladosa, J. C., Murat, I. Villaescusa. "Study on the toxicity of binary equitoxic mixtures of metals using the luminescent bacteria Vibrio fischeri as a biological target", *Chemosphere*, 58(5), 551-557, 2005.

[14] I. Villaescusa, M. Pilar, C. Hosta, M., Martinez, J. C. Murat. "Toxicity of cadmium species on luminescent bacteria", *Fresenius' Journal Of Analytical Chemistry*, 354, 566-570, 1996.

[15] M.C. Newman, J.T. McCloskey. "Predicting relative toxicity and interactions of divalent metal ions: Microtox® bioluminescence assay", *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 15(3), 275-281, 1996.

[16] A.B. Ishaque, L. Johnson, T. Gerald, D. Boucaud, J. Okoh, P.B. Tchounwou. "Assessment of individual and combined toxicities of four non-essential metals (As, Cd, Hg and Pb^{2+}) in the Microtox® assay", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 3(1), 118-120, 2006.

[17] J.T. McCloskey, M.C. Newman, S.B. Clark. "Predicting the relative toxicity of metal ions using ion characteristics: Microtox® bioluminescence assay", *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 15(10), 1730-1737, 1996.

[18] G. Rosen, A. Osorio-Robayo, I. Rivera-Duarte, D. Lapota. "Comparison of bioluminescent dinoflAg+ellate (QwikLite) and bacterial (Microtox®) rapid bioassays for the detection of metal and ammonia toxicity", *Archives Of Environmental Contamination And Toxicology*, 54, 606-611., 2008.

[19] C. Y. Hsieh, M.H. Tsai, D.K. Ryan, O.C. Pancorbo. "Toxicity of the 13 priority pollutant metals to *Vibrio fisheri* in the Microtox® ® chronic toxicity test", *Science Of The Total Environment*, 320(1), 37-50, 2004.

[20] E. Binaeian, A.A. Safekordi, H. Attar, R. Saber, M.J. Chaichi, A.H. Kolagar. "Comparative toxicity study of two different synthesized silver nanoparticles on the bacteria *Vibrio fischeri*", *African Journal of Biotechnology*, 11(29), 7554, 2012.

[21] O.N. Bae, J. Ariunzaya, J. Quantitative neurotoxic effects of heavy metals and glutamate in HT-22 cells, Doctoral dissertation, 2022.

[22] I. Halloum, H. Al-Attrache, K. El-Ghoz, L. Hammoud, Z. Abdel-Razzak. "Dose-dependent interaction of two heavy metals with amiodarone toxicity in Saccharomyces cerevisiae", *Toxicology and Industrial Health*, 38(5), 249-258, 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Teker İçi Motorlu Elektrikli Araçların Farklı Süspansiyon Modellerinin İncelenmesi, Yol Tutuş ve Konfor Açısından Karşılaştırılması

Lokman ATİK[a], Yusuf ALTUN[b], Osman Taha ŞEN[c]*

[a]Düzce Üniversitesi, Elektrikli Araçlar ve Dijital Dönüşüm Uygulama ve Araştırma Merkezi, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[c]İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.

[*]**Sorumlu Yazar:** lokmanatik@duzce.edu.tr

ÖZET

Otomotiv endüstrisinin gelişmesiyle içten yanmalı motorlu araçların yanında günümüzde mekanik diferansiyel içeren geleneksel elektrikli araçlar da yaygınlaşmıştır. Buna paralel olarak, diferansiyel içeren elektrikli araçlar kadar yaygın olmasa da teker-içi elektrik motorlu (hub-motor) tahrik mekanizması içeren çeşitli araçlar da (bisiklet, elektrikli motosiklet, golf aracı vb.) kullanılmaktadır. Bu alandaki ilk çalışmalarda hub-motorlar jant ve tekerlek aksına rijit bağlı olacak şekilde tasarlanmış, bu tasarımın sonucunda süspansiyon sisteminin yaysız kütlesinde artış meydana gelmiştir (35 → 80 kg). Böylece titreşimler doğrudan motora iletilmiş olmakta, motor yataklarında aşınma ve radyal kuvvetlerde artış görülmekte, bu durum motor ömrünü azaltmakta ve yol tutuşu ile sürüş konforunu düşürmektedir.

Söz konusu kütle artışının olumsuz etkilerinin azaltılması için birincil süspansiyona ek olarak literatürdeki ikincil bir süspansiyon öngören tasarımlara sahip çeşitli modeller araştırılmıştır. Bu modellerden dört tanesi seçilmiş ve bunlar üzerinde yaysız kütle artışı durumunda ortaya çıkan dinamikler incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte mevcut modellerden farklı bir model öngörülmüş ve literatürdeki modeller ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *İkincil süspansiyon, teker-içi motor (hub-motor), sürüş konforu, yaysız kütle artışı, yol tutuşu.*

Examination of Different Suspension Models of Electric Vehicles with In-Wheel Motors and Comparison in Terms of Handling and Comfort

ABSTRACT

With the development of the automotive industry, conventional electric vehicles with mechanical differentials have become widespread in addition to vehicles powered with internal combustion engines. In parallel, although not as common as electric vehicles equipped with mechanical differentials, various vehicles containing in-wheel electric motor (hub-motor) drive mechanisms (bicycles, electric motorcycles, golf carts, etc.) are also used. Initially, hub-motors were designed to be rigidly connected to the rim and wheel axle in these vehicles, which lead to the increase of the unsprung mass of the suspension system (35 → 80 kg). Thus, vibrations are transmitted directly to the electric motor, which causes wear on motor bearings and an increase in radial forces. Consequently, a reduction in motor life, road holding and driving comfort characteristics is inevitable.

In order to mitigate the negative effects of this mass increase, various models in the literature with designs that envisage a secondary suspension in addition to the primary suspension have been investigated. Four of these models were selected and the dynamics that emerged in case of unsprung mass increase were examined and compared with each other. Furthermore, a different model from the existing models was also proposed and compared with the models in the literature.

Keywords: *Secondary suspension, in-wheel motor (hub-motor), ride comfort, unsprung mass increase, road holding.*

I. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artışa bağlı olarak özellikle nüfus-yoğun şehirlerde fosil yakıtlı araç sayısının ve hava kirliliğinin de arttığı gözlenmektedir. Ulusal/uluslararası kurumlar tarafından zaman içerisinde araç emisyonlarının azaltılması için çeşitli standartlar getirilmiş ve içten yanmalı motor üreten şirketlerin bunlara uymaları zorunlu tutulmuştur. Ancak tüm bu uyum çabalarına rağmen nüfus artışı ve fosil yakıtlı araçlara olan talebin devam etmesi, hava kirliliğindeki artış hızının azalmasına engel olamamıştır. Hava kalitesiyle ilgili endişeler arttıkça, fosil yakıt tüketiminin çevresel etkisinin anlaşılmasıyla elektrikli araçlara yönelik araştırmalar yoğunlaşmıştır. Ayrıca fosil yakıtlarla ilgili artan maliyetler, elektrikli araçlara yönelik artan tercihi önemli ölçüde etkilemiştir.

Elektrikli araçların evrimi, özellikle tekerlek içi motorları entegre eden süspansiyon sistemlerinde, hem yönetimi hem de konforu optimize etmeyi amaçlayan yeniliklere yol açmıştır [1]. Geleneksel süspansiyon tasarımları, öncelikle içten yanmalı motorlu araçlar için geliştirilmiş olup, elektrikli tahrik sistemlerinin ağırlık dağılımı ve dinamiklerini karşılamakta zorlanmaktadır. Ağır pil paketleri ve dağıtılmış motor sistemleriyle elektrikli araçlarda, hızlanma, frenleme ve viraj alma manevralarında ağırlık transferini etkin bir şekilde yönetebilen süspansiyon sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Yaygın olarak kullanılan geleneksel elektrikli araçlarda diferansiyel sistemi bulunmaktadır. Elektrik motoru içten yanmalı motorlar gibi kaputun altındadır ve bataryalar aracın çeşitli bölgelerine yerleştirilmiştir. Önceleri, "merkezi motor tahrikli düzen" şeklinde olan elektrikli araçlar, son yıllarda Teker İçi Elektrik Motorlu (TİM) olacak şekilde tasarlanmaya başlamışlardır. Bununla birlikte TİM sistemlerindeki sorunların azalması ve yaygınlaşması için üzerinde daha fazla araştırma yapılmasına ve dolayısıyla zamana ihtiyaç olduğu görülmektedir. Teker içi motorlar, gelişmiş çekiş kontrolü, rejeneratif frenleme yetenekleri ve kompakt yapıya sahip olma gibi avantajlar sunarak elektrikli araç tahrik sistemleri için umut vaat eden bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır [2]. Ancak, tekerlek içine elektrik motoru entegrasyonu, çeşitli sürüş koşullarında optimal performansı sağlamak için süspansiyon tasarım prensiplerinin yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

TİM mekanizmalarında geleneksel olarak rotor ve stator, sırasıyla lastik jantına ve tekerlek aksına rijit bir şekilde bağlıdır, bu da büyük oranda yaysız kütleye yol açmaktadır [3]. Bu tasarımda yoldan gelen bozucu etkiler doğrudan lastiğe ve oradan da elektrik motoruna uygulanmakta, motorun hizmet ömrü, araç yol tutuşu ve araç sürüş konforu düşmektedir.

Son yıllarda Teker İçi Motor Tahrikli Elektrikli Araç (TİMT-EA) konseptinin popülaritesi her geçen gün artmakta olup bazı teknoloji yatırımcısı şirketler çeşitli TİM prototipleri ortaya koymuşlardır. Ayrıca araştırmacılar, teker içi motorlu elektrikli araçlar için farklı süspansiyon modellerinin yönetim ve konfor özelliklerini değerlendirmeye yönelik kapsamlı çalışmalar yürütmüşlerdir [4]. Süspansiyon performansını çeşitli sürüş senaryoları altında değerlendirmek için sayısal simülasyonlar, laboratuvar deneyleri ve gerçek araç testlerinin bir kombinasyonu olacak şekilde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Araştırmacılar tarafından süspansiyon geometrisi, sönümleme özellikleri ve kontrol algoritmaları gibi faktörler analiz edilerek, yol tutuş ve sürüş konforu arasında denge sağlayan optimal süspansiyon parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. TİM'lerin tekerleklere doğrudan bağlanması sonucu yaysız kütle artışına, böylece sürüş konforu performansı ile yol tutuş kabiliyetinde düşüşe neden olmalarından dolayı çalışmalar bu problemlerin çözümüne odaklanmıştır. Motor yatağı aşınması, motor titreşimi, hava boşluğu eksantrikliği (*merkezden kaçıklık*) ve artık radyal kuvvetler gibi diğer sorunlar da konfor ve yol tutuşu olumsuz etkileyebilmektedir. Aktif/yarı-aktif süspansiyon ve optimize edilmiş pasif süspansiyon sistemleri ile TİMT-EA'larda sürüş konforu ve güvenlik artırılmaya çalışılmıştır [5].



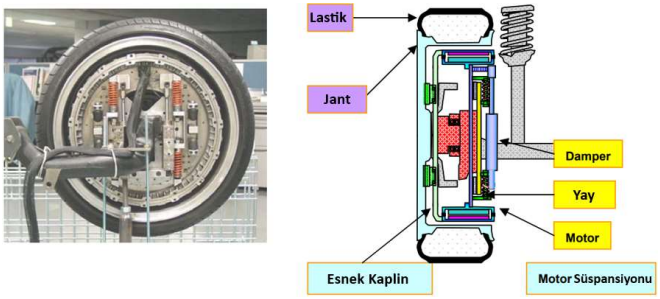
Şekil-1: REEcorner firmasının e-Mobility adlı elektrikli mobil platformu [7].

TİMT-EA'ların sürüş konforunu iyileştirmek için, tekerleğin dikey hareketinden kaynaklanan olumsuz etkilerin bastırılmasına yönelik çeşitli araştırmalar yürütülmüştür. Bridgestone, Michelin, Siemens, Protean vb. firmalar farklı tasarımlarla prototipler ortaya koymuşlardır. Bu yaklaşımların en önemli özelliklerinden biri, tekerlekler arasında mekanik bağlantıların olmaması ve bu sayede dört tekerleğin tümünün ayrı ayrı kontrol edilebilmesidir. Ayrıca TİM'ler daha iyi dinamik kontrol, daha küçük alan kullanımı, daha yüksek sürüş verimliliği ve yedekli sürüş sistemi entegre edilebilme gibi büyük bir potansiyele sahiptir [6].

Normal koşullarda ~30 kg civarı olan ortalama bir tekerleğin ağırlığı, TİM tasarımına göre farklılık göstermekle beraber ~70-80 kg'a kadar artabilmektedir [6]. Buna paralel olarak araç dinamiği bağlamında kütle transferinde artış ve yüksek genlikli salınım da kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle yaysız kütlede 20% ~ 50% oranındaki artış 8-10 Hz civarı frekanslarda sistem cevabında bir artışa yol açmakta, bunun sonucunda sürüş konforu ve yol tutuş performansı olumsuz etkilenmektedir ([5], [8], [9]).

Artan yaysız kütle ile bağlantılı olarak genel sürüş deneyiminin kötüleşmesi muhtemeldir. Bu aynı zamanda lastik ile yol arası bağlantının kötüleşmesine, dolayısıyla da aracın frenleme yeteneğinin azalmasına (*durma mesafesinin artmasına*) neden olmaktadır. Literatürde bulunan birçok çalışma, bu durumun aracın yol tutuş ve viraj alma yeteneğini olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca pürüzlü yol, lastik ve TİM'i olumsuz etkilemekte, elektrik motorunun stator ve rotoru arasında nispi radyal harekete neden olabilmekte ve TİM'in ömrünü kısaltabilmektedir [6]. Bu problemi aşmak ve TİM'lerin kütlesinin araç dinamiği ekseninde dengeli olmasını sağlamak için birçok çalışma yürütülmüştür.

Yaysız kütlenin etkisinin azaltılması adına yürütülen çalışmalardan Bridgestone'nun yaptığı Dynamic Damping IWM (*in-wheel-motor*) prototipi, bu alanda yapılan çalışmaların en önemlilerinden biridir. Bu sistemde ayrı bir süspansiyon sistemi kullanılarak (*yay ve esnek kaplin*) TİM yaysız kütleden ayırılmış, böylece TİM'in yol ve lastiklerden kaynaklanan titreşimleri dengeleyen dikey hareketlere sahip olması sağlanmış ve sürüş konforu ile yol tutuş kapasitesi arttırılmıştır (*tekerleğin zeminle temasından kaynaklanabilen yük dalgalanmasında azalma*). Böylece tekerleğin viraj kuvvetinin ortalama değeri arttırılmış olmaktadır [10].



Şekil-2: Bridgestone'un Advanced Dynamic Damping In-Wheel Motor Drive System prototipi [11].

Benzer bir çalışma Siemens VDO firması tarafından yapılmıştır. Advanced eCorner olarak isimlendirilen bu TİM, aktif süspansiyon sistemi ve elektromekanik disk fren içeren gelişmiş bir TİM olarak öne çıkmaktadır.



Şekil-3: Siemens VDO'nun Advanced eCorner ve Michelin'in The Active Wheel prototipleri [9], [12].

Michelin tarafından oluşturulan prototipte ise (*The Active Wheel*), biri hızlanma – yavaşlama için ve diğeri aktif süspansiyon için olmak üzere iki elektrik motoru bulunmaktadır. Michelin'in oluşturduğu bu prototipe de bir teker içi aktif süspansiyon entegre edilmiş ve yaysız kütle etkisi bu sayede azaltılmaya çalışılmıştır. Bu üç markanın oluşturduğu konseptlerin ortak noktası, birincil süspansiyon sistemlerinin yanında ikincil bir süspansiyon sistemine sahip olmalarıdır.

Sert süspansiyonun iyi bir araç kullanımı sağladığı fakat aynı zamanda yol girdisinin çoğunu araç gövdesine aktardığı, yumuşak süspansiyonun daha konforlu bir sürüş sağladığı fakat dönüşlerde ve şerit değiştirme manevralarında otomobilin dengesini önemli ölçüde azalttığı bilinmektedir [13]. Bu durumda yaysız kütle artışının sonucu olarak ortaya çıkan ve birbirlerine ters orantılı olarak değişen konfor ve yol tutuş parametrelerinin dengelenmesi, optimal performansın elde edilebilmesi için, aracın süspansiyon sisteminin farklı hızlarda ve farklı frekanslardaki bozuculara maruz kaldığında en ideal cevabı üretebiliyor olması gerekmektedir. Bu da kontrol edilebilir süspansiyon sistemlerinin kullanılması ile mümkün

olabilmektedir. Bu amaçla TİM mekanizmalarında bu problemin üstesinden gelebilmek için aktif veya yarı-aktif süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada, yaysız kütle artışının ortaya çıkardığı problemlerin nasıl meydana geldiğinin ve sonuçlarının neler olduğunun belirlenmesi adına öncelikle standart tip bir süspansiyon sistemi incelenmiş, ikinci olarak teker içi elektrik motorlu bir sistemde görülen kütle artışının etkilerinin ortaya konması amacıyla kütle artışı simüle edilmiş, üçüncü olarak ise ikincil bir süspansiyon sisteminin olması durumunda gözlemlenen iyileştirmelerin neler olduğu tartışılmıştır. Ardından, teker içi motor tahriki ve ikincil süspansiyon içeren sistemler göz önünde bulundurularak literatür araştırması yapılmış ve birinci ve ikinci doğal frekanslardaki davranışlarını karşılaştırmak için literatürde sıklıkla baş vurulan dört farklı model seçilmiştir. Ayrıca, bu dört modelin haricinde, yine literatürden referans alarak farklı bir model oluşturulmuş ve diğer dört model ile birlikte incelenmiştir.

Sürüş kalitesini iyileştirmek için, yaylı kütleyi yol pürüzlülüklerinden izole etmek ve ISO 2631'e göre insan vücuduna duyarlı bir frekans aralığı olduğu bilinen 5 Hz (*4 – 8 Hz*) civarındaki dikey titreşimleri bastırmak önemlidir. Öte yandan, aracın yol tutuş performansını iyileştirmek için lastiğin yol yüzeyi ile temas halinde olması ve bu nedenle rezonans tepe noktasının 8-10 Hz (*yaysız kütlenin rezonans frekansı*) civarında azaltılması gerekir. Sabit bir süspansiyon yay sabiti için, yumuşak bir sönümleme ile, yani daha büyük bir süspansiyon sapmasına izin vererek yaylı kütlenin yol bozukluklarına karşı daha verimli izolasyonu sağlanabilir. Bununla birlikte, gereksiz süspansiyon sapmalarına izin vermeyerek sert bir sönümleme ile daha iyi yol teması elde edilebilir. Tüm bu veriler ile yapılan değerlendirme sonucunda süspansiyon sistemlerine yönelik kontrol sistemi tasarımı yapılırken aracın sürüş kalitesi ve yol tutuş performansı birbiriyle çelişen iki kriter olarak karşımıza çıkmaktadır [14].

Genel olarak sürüş kalitesi, araç gövdesinin (*dolayısıyla yolcu konumunun*) dikey ivmesi ile ölçülür. İyi tasarlanmış bir süspansiyon, akstan araç gövdesine iletilen titreşim kuvvetlerini azaltarak izolasyon sağlar ve araç gövde ivmesini azaltır. Öte yandan, aracın viraj alma, frenleme ve çekiş yetenekleri açısından karakterize edilebilecek iyi bir yol tutuş performansını sürdürülebilmesi için normal lastik yüklerinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bunun nedeni, lastikler tarafından üretilen yanal ve boylamsal kuvvetlerin doğrudan normal lastik yüklerine bağlı olmasıdır. Lastikler dikey kuvvetlere tepki olarak yay gibi davrandığından, normal lastik yüklerindeki değişimler doğrudan dikey lastik sapmaları ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, aracın izin verilen süspansiyon çalışma alanı dikkate alınarak optimum sürüş konforu ve yol tutuş performansı elde edilir [15]. Böylece bir süspansiyon sisteminin performansı aşağıdaki sinyallerle karakterize edilebilir:

- Yolcu konforunun bir ölçüsü olarak araç gövde ivmesi,
- Yol tutuş ölçüsü olarak tekerlek temas kuvveti (*ya da tekerlek dikey sapması*),
- Süspansiyon sistemi ile ilgili olarak süspansiyon çalışma alanı (*süspansiyon sapması*).

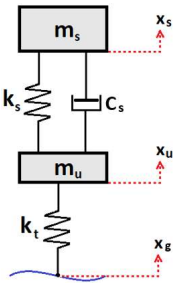
Bu sinyaller zaman alanında veya frekans alanında ya da daha kompakt olarak ortalama karekök (*root-mean-square – RMS*) değerlerinde sunulabilir. Etkili bir "süspansiyon sistemi kontrol stratejisi", üç sinyali de en aza indirmelidir [16].

Aktif/yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin, geleneksel pasif sistemlere göre sürüş konforunda önemli faydalar sağladığı bilinmektedir. Ancak, güç gereksinimi, maliyet gibi durumlar aktif süspansiyon sistemleri için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu eksikliklerle başa çıkmak için yarı-aktif süspansiyon sistemleri geliştirilmiştir. Audi, VW, Mercedes, Ford, Volvo ve GM gibi otomobil üreticileri, farklı türlerde yarı-aktif süspansiyon sistemleri tasarlamak, geliştirmek ve üretmek için Sachs, Tenneco, Bilstein ve Monroe gibi kontrol edilebilir amortisör tedarikçileriyle işbirlikleri yapmışlardır [17].

Bu çalışmada süspansiyon sistemleri pasif bir sistem olarak ele alınmış, aktif/yarı-aktif süspansiyon sistemlerin mevcut olduğu modeller bu çalışmada incelenmemiştir. Yapılması düşünülen bu incelemeler gelecekte yapılacak çalışmalar olarak değerlendirilmektedir.

A. Standart Tip Süspansiyon Sistemi (1. Durum)

Standart tip süspansiyon sistemi, iki kütleli (yaylı ve yaysız kütleler) ve bu ikisi arasında yay ve damper olan, ayrıca lastiğe ait sertliği standart bir yay ile modelleyen sistem olarak Şekil-4'teki gibi ifade edilir;



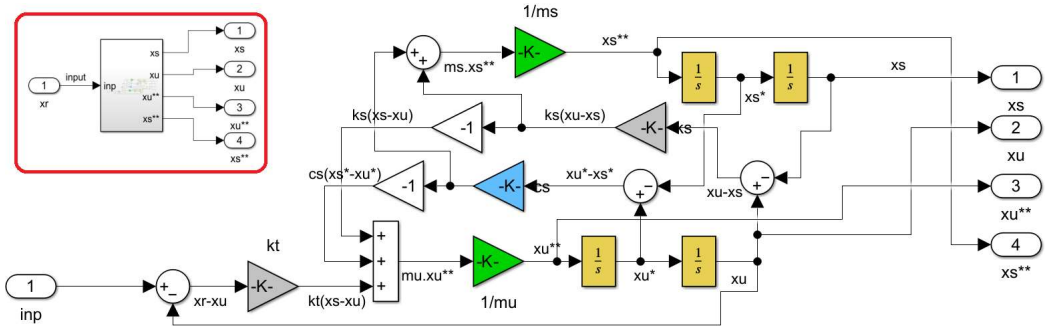
Şekil-4: Standart tip süspansiyon sisteminin fiziksel modeli.

Bu sistemin matematik modeli Newton'un 2. Kanunu yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\boldsymbol{m_s\ddot{x}_s + k_s(x_s - x_u) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = 0} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{m_u\ddot{x}_u + k_t(x_u - x_g) - k_s(x_s - x_u) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = 0} \quad (2)$$

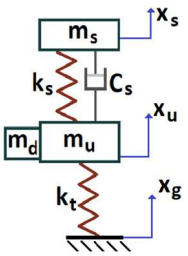
Burada $\boldsymbol{m_s}$ yaylı kütleyi, $\boldsymbol{m_u}$ yaysız kütleyi, $\boldsymbol{k_s}$ süspansiyon yay sabitini, $\boldsymbol{b}$ damper sönüm sabitini, $\boldsymbol{k_t}$ tekerlek yay sabitini, $\boldsymbol{x_s}$ yaylı kütlenin yer değiştirmesini, $\boldsymbol{x_u}$ yaysız kütlenin yer değiştirmesini ve $\boldsymbol{x_g}$ yolden gelen girdileri temsil etmektedir. (1) ve (2) ile matematiksel olarak ifade edilen standart tip süspansiyon sisteminin fonksiyonel diyagramı Matlab/SIMULINK programında Şekil-5'te gösterildiği gibi oluşturulmuştur;



Şekil-5: Standart tip süspansiyon sisteminin Matlab/SIMULINK ortamındaki fonksiyonel diyagramı.

B. Teker İçi Motorlu Mekanizmalarda Standart Tip Süspansiyon Sistemi - Yaysız Kütle Artışı (2. Durum)

Teker içi motor tahrikli bir sistemde geleneksel süspansiyon sistemi kullanılması durumunda fiziksel model Şekil-6'daki gibi olmaktadır;



Şekil-6: Standart tip süspansiyon sisteminde yaysız kütle artışı.

Şekilden de anlaşılacağı üzere, yaysız kütlede, elektrik motorundan kaynaklanan bir kütle artışı görülmektedir ($\boldsymbol{m_d}$). Sistemin matematik modeli ise yine Newton'un 2. Kanunu yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir;

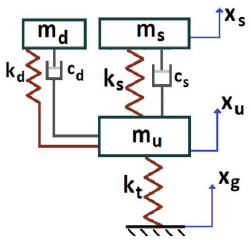
$$\boldsymbol{m_s\ddot{x}_s + k_s(x_s - x_u) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = 0} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{(m_u + m_d)\ddot{x}_u + k_t(x_u - x_r) - k_s(x_s - x_u) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = 0} \quad (4)$$

Burada $\boldsymbol{m_d}$ motor kütlesini temsil etmektedir.

C. Teker İçi Motorlu Mekanizmalarda İkincil Süspansiyon Sistemi (3. Durum)

Yaysız kütle artışının yanında ikincil bir süspansiyon sisteminin olması durumunda fiziksel model Şekil-7'deki gibi olmaktadır;



Şekil-7: Yaysız kütle artışı ve ikincil süspansiyon kullanılması.

Bu sisteme ait matematik model yine Newtonun 2. Kanunu yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\boldsymbol{m_s\ddot{x}_s(t) + k_s\big(x_s(t) - x_u(t)\big) + c_s\big(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)\big) = 0} \quad (5)$$

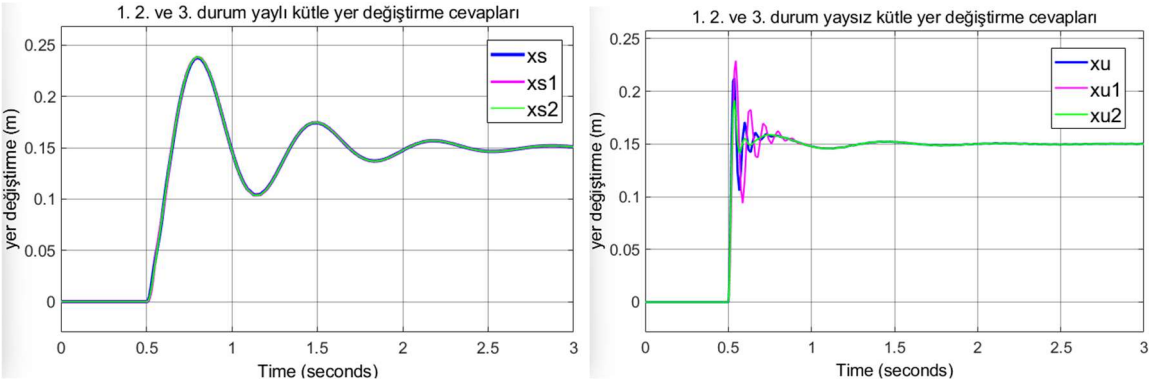
$$\boldsymbol{m_d\ddot{x}_d(t) + k_d\big(x_d(t) - x_u(t)\big) + c_d\big(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_u(t)\big) = 0} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{m_u\ddot{x}_u(t) - k_s\big(x_s(t) - x_u(t)\big) - c_s\big(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)\big) - k_d\big(x_d(t) - x_u(t)\big) - c_d\big(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_u(t)\big) + k_t\Big(x_u(t) - x_g(t)\Big) = 0} \quad (7)$$

Burada $\boldsymbol{x_d}$ $\boldsymbol{m_d}$'nin dikey yer değiştirmesidir. İkincil süspansiyonun sertliği ve sönüm katsayısı ise sırasıyla $\boldsymbol{k_d}$ ve $\boldsymbol{c_d}$'dir.

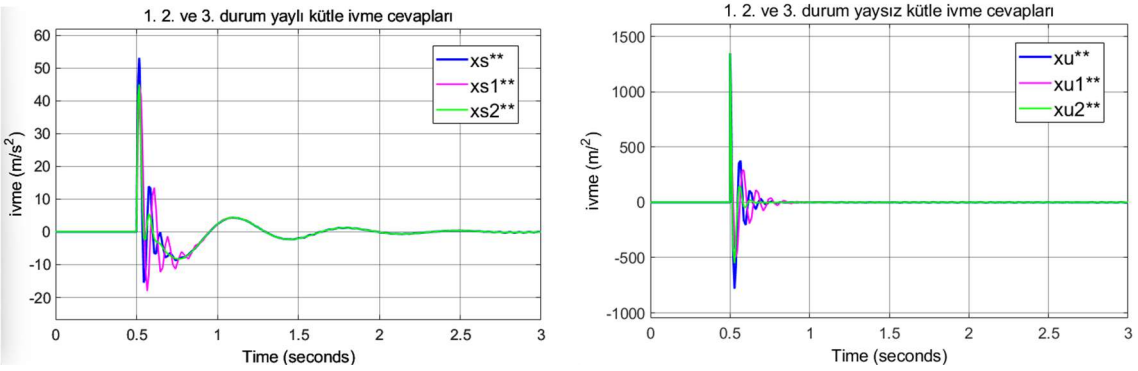
D. Durum-1, Durum-2 ve Durum-3'e Ait Simülasyon Çalışmaları

Yukarıda bahsedilen 3 durumun yaylı ve yaysız kütlelerine birim basamak giriş verildiğinde sistemlere ait yer değiştirme ve ivme cevapları Matlab/SIMULINK ortamında yapılan simülasyon çalışmaları sonucu Şekil-8 ve 9'daki gibi elde edilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil-8: 1., 2. ve 3. durumların yaylı ve yaysız kütlelerinin birim basamak girişe verdikleri yer değiştirme cevapları.

Her üç süspansiyon sistemine de basamak giriş verildiğinde her ne kadar yaylı kütle yer değiştirme miktarlarında önemli bir değişiklik görülmemiş olsa da, yaysız kütlelerin dikey yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında 3. durumda (*ikincil süspansiyon sisteminin olduğu durum*) titreşimin azaldığı ve daha hızlı kararlı hale geldiği görülmektedir. Ayrıca 1. durum ile 2. durum karşılaştırıldığında yaysız kütle artışının yer değiştirme değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir.

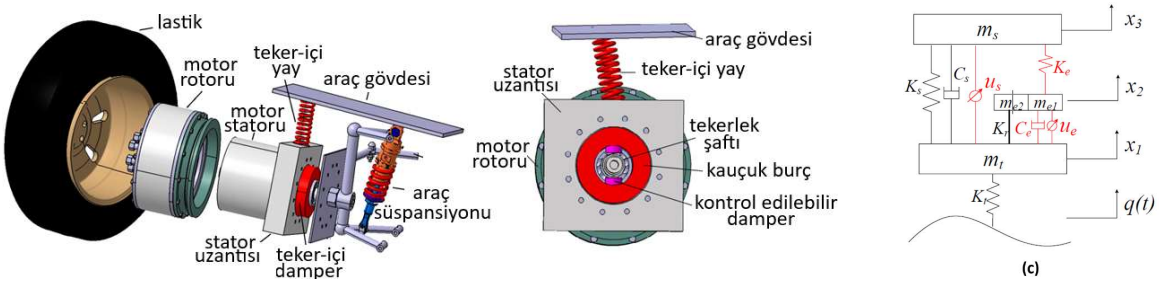


Şekil-9: 1., 2. ve 3. durumların yaylı ve yaysız kütlelerinin birim basamak girişe verdikleri ivme cevapları.

Her üç süspansiyon sisteminin ivme değerleri Şekil-9'daki gibi elde edilmiş olup 1. ve 2. durumlar karşılaştırıldığında yaylı ve yaysız kütle ivme değerlerinde genlik olarak çok fazla bir değişimin olmadığı, fakat daha uzun süre salınım yaptığı anlaşılmaktadır. 3. durumda ise ivme genliklerinin başlangıçta kısmen benzer olduğu fakat zaman içinde hızla azaldığı ve sistemin daha hızlı kararlı hale geldiği (*salınımların sönümlenmesi*) görülmektedir.

E. Farklı Modellerin İncelenmesi

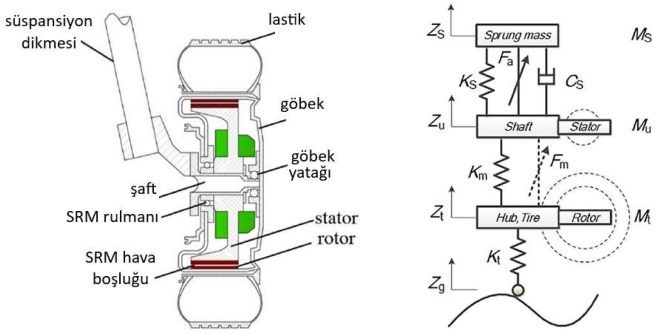
Teker içi motor tahriki ve ikincil süspansiyon içeren sistemler göz önünde bulundurularak literatür araştırması yapılmış ve bunlardan sıklıkla başvurulan Şekil-10, 11, 12 ve 13'teki modeller incelenmiştir. Şekillerdeki modeller sırasıyla Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4 olarak isimlendirilmiştir.



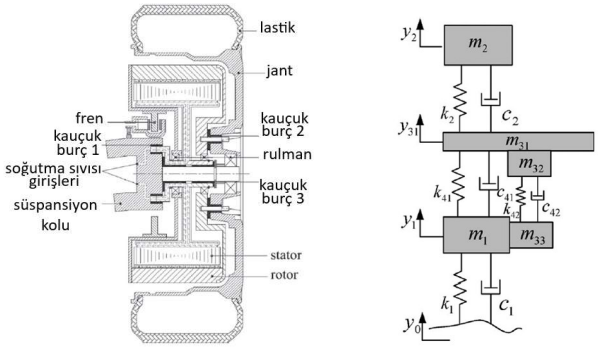
Şekil-10: Model-1'in 3D tasarımı ve sisteme ait kütle-yay-damper modeli [14].



Şekil-11: Model-2'nin 3D tasarımı ve sisteme ait kütle-yay-damper modeli [15].

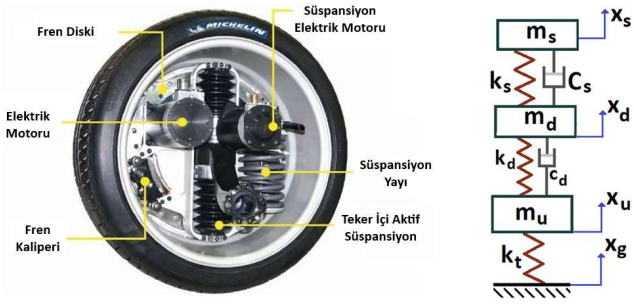


Şekil-12: Model-3'ün 2D çizimi ve sisteme ait kütle-yay-damper modeli [16].



Şekil-13: Model-4'ün 2D çizimi ve sisteme ait kütle-yay-damper modeli [17].

Ayrıca, Michelin'in The Active Wheel modeli, bu ekip tarafından yapılması planlanan sonraki çalışmalarda kullanılacak deney düzeneğindeki fiziksel yapıyı karşılayan bir model olduğu için önceki dört modelle birlikte karşılaştırma çalışmalarında kullanılmıştır. Aşağıda Şekil-14'te bu modele ait prototip ve kütle-yay-damper modeli görülmektedir. Bu model de Model-5 olarak isimlendirilmiştir.

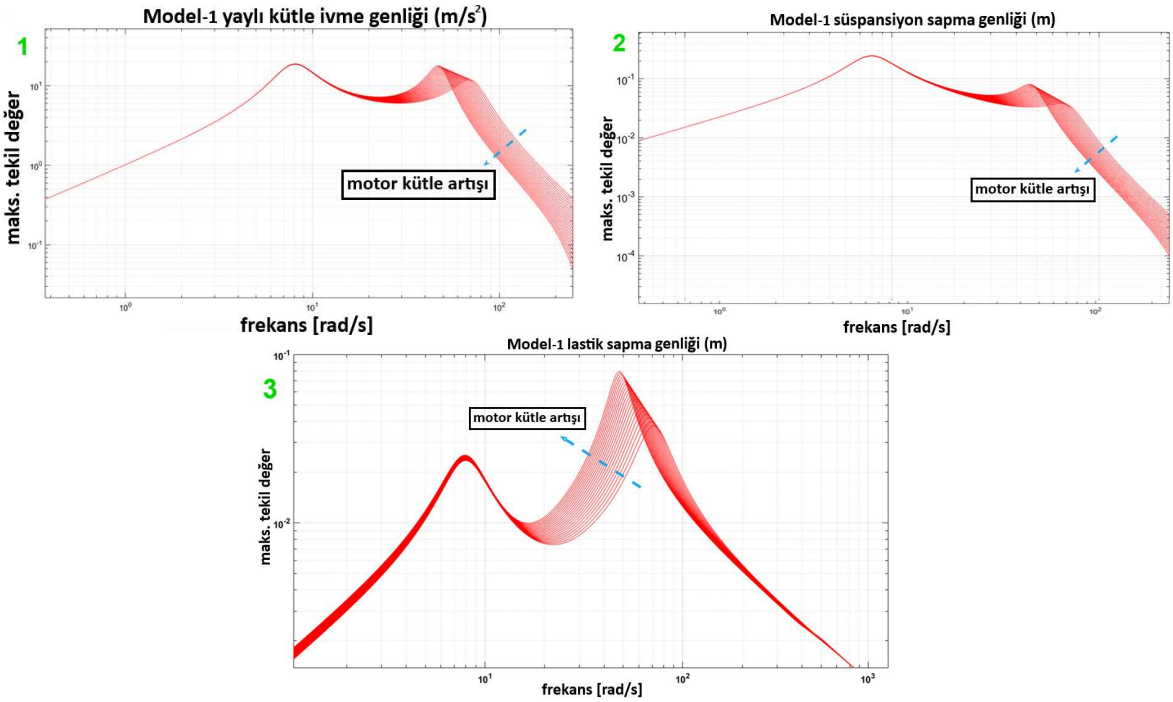


Şekil-14: Model-5'in prototipi [12] ve sisteme ait kütle-yay-damper modeli.

Tüm bu modeller baz alınarak yaysız kütle artışının ve ikincil süspansiyonun, sistemlerin birinci ve ikinci doğal frekanslarındaki etkileri incelenmiştir. Genel anlamda süspansiyon sistemlerinde yaylı ve yaysız kütlelerden kaynaklanan iki rezonans frekansı (*doğal frekans*) bulunmaktadır. Seçili modellerin her iki frekans civarındaki yer değiştirme ve ivme sinyallerine ait genlikler Matlab/SIMULINK ortamında elde edilmiştir. II. Bölümde, bir süspansiyon sisteminin performansı ile ilgili üç kriterden bahsedilmişti, bunlar; yolcu konforunun bir ölçüsü olan araç gövdesine ait ivme değerleri, aracın yol tutuşunu karakterize eden tekerlek dikey yer değiştirmeleri ve süspansiyon çalışma alanına karşılık gelen süspansiyon sapma miktarları olarak belirtilmişti. Bir sonraki bölümde Model-1, 2, 3, 4 ve 5'in bu üç sinyale göre Bode diyagramları oluşturulmuş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

F. Modellerin Bode Diyagramlarının Karşılaştırılması

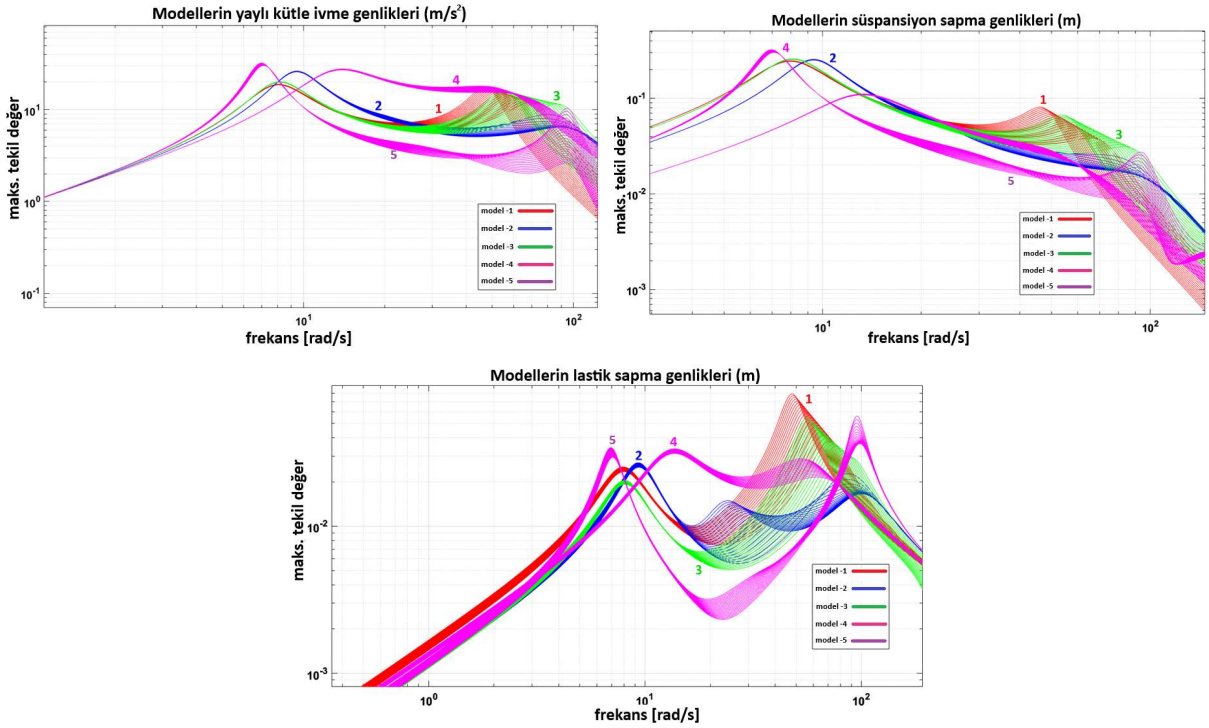
Seçili modellerde yaysız kütle artışı olduğunda, standart tip süspansiyonda yaysız kütle artışı olduğu durumda sinyallerin genliklerinde görülen artışa benzer şekilde artışlar gözlenmiştir. Bu durumu ortaya koyma amacıyla Matlab/SIMULINK ortamında simülasyon çalışmaları yapılmış ve modellerin Bode diyagramları elde edilmiştir. Tüm modellerde birbirlerine benzer sonuçlar gözlemlendiğinden dolayı örnek olması amacıyla Şekil-15'te Model-1'e ait Bode diyagramları verilmiştir.



Şekil-15: Model-1'e ait yaysız kütle artışı durumunda 1- yaylı kütle ivmesi 2- süspansiyon sapması ve 3- lastik sapması genliklerinde görülen artışı ortaya koyan Bode diyagramları.

Şekil-15'te de görüldüğü üzere, süspansiyon sisteminde motor kütlesi arttıkça çıkış sinyallerinin genliklerinde, 1. doğal frekans civarında çok fazla olmamakla birlikte ikinci doğal frekans etrafında artış görülmektedir. Motor kütlesinin artmasıyla 1. grafikte yaylı kütlenin ivme genliklerinde, 2. grafikte süspansiyon sapmasına ait genliklerde ve 3. grafikte de lastik sapmasına ait genliklerde artış görülmektedir. Aynı zamanda sistemin doğal frekansı da bir miktar azalmaktadır.

Bununla birlikte; yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapması sinyalleri ayrı ayrı baz alınarak modellerin hepsinin Bode diyagramları her modelin kendi parametre değerleri kullanılarak üst üste çizdirilmiştir. Yaysız kütledeki "motor kütlesine bağlı olan artışın" sistemin frekans cevabı üzerindeki etkileri aynı grafikte incelenmiştir. Şekil-16'da sırasıyla, beş modele ait yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapması genliklerinin karşılaştırmaları gösterilmektedir.



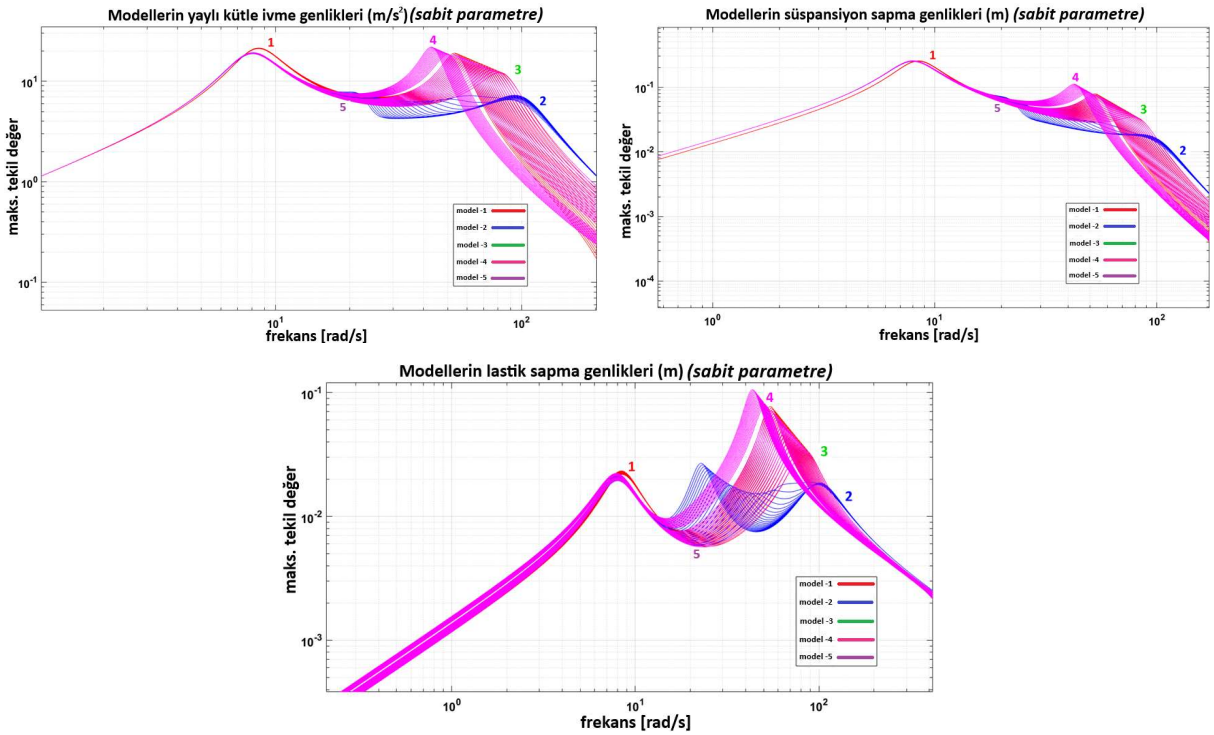
Şekil-16: Tüm modellere ait yaysız kütle artışı durumunda; yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapmasına ait Bode diyagramları.

İvme genlikleri karşılaştırıldığında; 2. modelde birinci doğal frekans civarında ivme genliklerinin yüksek olduğu, ikinci doğal frekans civarında ise daha düşük olduğu, 4. modelde ise 1. doğal frekansının ve genliğinin daha büyük olduğu, ayrıca 2. doğal frekans etrafında genliklerin de yüksek olduğu, diğer iki modelin birinci doğal frekans civarı benzer davranışlar sergilediği, ikinci doğal frekans civarında ise 2. modelin 3. modele göre nispeten genliklerinin fazla olduğu, 5. model incelendiğinde birinci doğal frekans civarı genliklerin yüksek olduğu ve ayrıca frekans değerinin diğer modellere göre daha küçük olduğu, ikinci doğal frekans etrafında ise genliklerin 1. modelden yüksek fakat diğerlerinden nispeten düşük olduğu görülmektedir.

Süspansiyon sapma genlikleri karşılaştırıldığında; 1. ve 3. modeller birinci ve ikinci doğal frekans civarında genel olarak benzer davranış sergilemektedir. 2. model birinci doğal frekans civarında 1. ve 3. modelle benzer olmakla birlikte ikinci doğal frekans civarında daha düşük genliklere sahiptir. 5. Model birinci doğal frekans etrafında diğerlerine oranla daha yüksek genliklere sahip olup, ikinci doğal frekans civarında ise nispeten daha düşük genliklere sahiptir. 4. model ise her iki frekans civarlarında en düşük genliklere sahip olduğu görülmektedir.

Lastik sapma genlikleri karşılaştırıldığında; 1., 2. ve 3. modeller birinci doğal frekans civarında genel olarak benzer genliklere sahiptir. 4. model ise birinci doğal frekans civarında diğerlerinden daha yüksek genliğe sahiptir. 1. model ikinci doğal frekans civarında en yüksek genliğe sahiptir. 2. model ise en düşük genliğe sahiptir. 5. model genel olarak hem birinci hem de ikinci doğal frekans civarında diğerlerine oranla yüksek genliklere sahip olduğu görülmektedir. Fakat, ikinci doğal frekans civarında 1. modelin en yüksek genliklere sahip olduğu unutulmamalıdır.

Son olarak modellerin hepsi, yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapması sinyalleri ayrı ayrı baz alınarak ve temel parametre değerleri aynı seçilerek (*örn: yaylı kütle, yaysız kütle, motor kütlesi, birincil süspansiyon yay sabiti, birincil süspansiyon damper sönüm sabiti, ikincil süspansiyon yay sabiti vb.*) karşılaştırılmıştır. Şekil-17'de sabit parametre durumu için sırasıyla, beş modele ait yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapması genliklerinin karşılaştırmaları gösterilmektedir.



Şekil-17: Tüm modellere ait yaysız kütle artışı durumunda; yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması ve lastik sapmasına ait Bode diyagramları (*parametrelerin sabitlendiği durum*).

Yaylı kütle ivme genlikleri karşılaştırıldığında; 1. model hariç diğer modellerin birinci doğal frekans etrafında hemen hemen aynı genliklere sahip oldukları, 1. modelin daha yüksek bir genliğe sahip olduğu, ikinci doğal frekans civarında ise en yüksek genlik değerinin 4. modele ait olduğu ve 2. modelin en düşük genliğe sahip olduğu görülmektedir.

Süspansiyon sapma genlikleri ve lastik sapma genlikleri karşılaştırıldığında; bir önceki grafiğe benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Genel bir değerlendirme yapıldığında bu dört model arasından ikinci modelin diğer modellere oranla daha düşük genliklerde cevap ürettiği anlaşılmaktadır.

III. SONUÇLAR

Yapılan analizler sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Standart tip bir süspansiyon sisteminde yaysız kütle artışı olduğunda;

- Yaysız kütle yer değiştirme genliklerinin ve salınım periyodunun arttığı,
- Yaylı ve yaysız kütle ivme genliklerinde çok fazla bir değişimin olmadığı, ancak salınım periyodunun arttığı,

Standart tip bir süspansiyon sisteminde ikincil süspansiyon sistemi kullanıldığında;

- Yaysız kütlenin dikey yer değiştirme salınımlarının azaldığı,
- Yaylı ve yaysız kütlenin ivme genliklerinin başlangıçta kısmen benzer olduğu fakat zaman içinde hızla azaldığı ve sistemin daha hızlı kararlı hale geldiği,

Literatürdeki modeller incelendiğinde;

- Motor kütlesi arttıkça, özellikle ikinci doğal frekans civarında çıkış (*yaylı kütle ivmesi, süspansiyon sapması, lastik sapması*) genliklerinde artış olduğu,
- Her modelin kendi parametreleri ile yapılan simülasyonlarda, modellerin frekans cevaplarında her modelin kendine özgü cevaplarının olmasının yanında genel olarak birinci doğal frekans etrafında genliklerde fazla değişim olmadığı, değişimlerin çoğunlukla ikinci doğal frekans etrafında olduğu ve modellerin birbirlerinden farklı cevaplar ürettiği,
- Tüm modeller için temel parametreler aynı seçilerek yapılan simülasyonlarda da ilk durumdakine benzer sonuçların ortaya çıktığı,

gözlemlenmiştir.

IV. TARTIŞMA

Kullanım amacı kişiye göre değişebileceği gerçeğinin göz ardı edilmemesi kaydıyla, burada analizi yapılan süspansiyon sistemlerinden herhangi biri kullanıcı/uygulayıcı tarafından seçilebilir ve kullanılabilir. Bunun nedeni modellere ait 1. ve 2. doğal frekans değerlerinin kısmen birbirlerinden farklı olması (*farklı uygulama durumlarına göre rezonans değerleri de değişebilir*) ve ayrıca sinyal genliklerinde de farklılıklar gözlemlenmesi (*kritik frekans haricindeki genlikler önemli olmayabilir*) olarak düşünülebilir. Kullanıcı/uygulayıcı, yapılacak çalışmaya göre kendine en uygun olanı seçebilir.

Bununla birlikte çoğu zaman sistemde, mevcudiyeti zaruri olan çeşitli kısıt parametreleri bulunabilmektedir. Bu durum da hesaba katıldığında ve akabinde eğer kontrolcü tasarımı yapılacaksa kullanıcı/uygulayıcı tarafından daha özellikli bir modelin seçilmesi muhtemeldir.

Sonuç olarak, modeller üzerinde farklı kısıt durumları da göz önünde bulundurularak daha kapsamlı çalışma ile (*parametre optimizasyonu, kontrolcü tasarımı vb.*) kullanıcı/uygulayıcının kendine en uygun modele karar vermesi mümkündür. Ayrıca, yapılacak çalışmaların ticari boyutunun da değerlendirilmesi önem arz ettiğinden ticari olarak daha kabul edilebilir bir model tercih edilmesi ve onun üzerinden optimal süspansiyon belirlenmesi, tasarlanması ve kontrolcü uygulamalarının yapılması amaca daha uygun olacaktır.

V. ÇIKARIM

Tüm bu çalışmaların sonucunda "teker içi motor tahrikli sistemlerde yaysız kütle artışının görüldüğü, bu artışın konfor ve yol tutuş performansı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu, bu problemin üstesinden gelmek için ikincil bir süspansiyon sisteminin öngörüldüğü, bu tip durumlarda bu problemler için ikincil süspansiyonun bir çözüm olabildiği, bu şekilde tasarımlar yapan birçok çalışmanın olduğu, bu çalışmalardan bazıları üzerinde yapılan analizler sonucunda sistemin birinci ve ikinci doğal frekansları civarında ikincil süspansiyon sisteminin genlikleri azaltıcı etkisinin olduğu, ihtiyaca göre farklı modellemelerin çalışmalarda kullanılabileceği, asıl önemli olanın kendi sistemine en uygun modelin kullanılması gerektiği" şeklinde çıkarımlar elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje No: 2024.06.01.1454.

KAYNAKLAR

[1] Smith, J., & Johnson, A. (2018). Suspension Systems for Electric Vehicles: A Review. Journal of Automotive Engineering, 12(3), 45-58.
[2] Brown, R., & White, S. (2020). Integration of In-Wheel Motors in Electric Vehicles: Design Challenges and Opportunities. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(5), 2201-2213.
[3] Van Schalkwyk, D. J., & Kamper, M. J. (2006). Effect of hub motor mass on stability and comfort of electric vehicles. In 2006 IEEE vehicle power and propulsion conference (pp. 1-6). IEEE.
[4] Wang, Y., et al. (2017). Numerical Simulation of Suspension Models for Electric Vehicles with In-Wheel Motors. Sustainable Transportation Journal, 5(1), 67-79.
[5] Shao, X, "Active suspension control of electric vehicle with in-wheel motors", Doctor of Philosophy thesis, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, Australia, June 2018.
[6] Kobrle, P. (2012). Selected problems of electric vehicle dynamics. Transactions on Transport Sciences, 5(3), 137.
[7] (2024) The REE Automotive website. [Online]. Available: https://ree.auto/contact/
[8] Hag, J., "Wheel corner modules: technology and concept analysis", Master Thesis, Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology, Solviks Folkhögskola, Sweden, 2011.
[9] Erol, B., & Delibaşı, A. (2018). Proportional–integral–derivative type H∞ controller for quarter car active suspension system. Journal of Vibration and Control, 24(10), 1951-1966.
[10] Nagaya, G., Wakao, Y., & Abe, A. (2003). Development of an in-wheel drive with advanced dynamic-damper mechanism. JSAE review, 24(4), 477-481.
[11] Bridgestone dynamic-damping in-wheel motor drive system. (2024) [Online]. Available: http://enginuitysystems.com/files/In-Wheel_Motor.pdf
[12] De Geus, V., "Model Predictive Controller Design for an Autonomous Corner Module", Master Thesis, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering·Delft University of Technology, Holland, April 2010.
[13] Alhusein, N. I., (2017), Using Of In-Wheel Motors in Passive Suspension System, World Wide Journal of Multidiciplinary Research and Development, e-ISSN: 2454-6615.
[14] Liu, M., Gu, F., & Zhang, Y. (2017). Ride comfort optimization of in-wheel-motor electric vehicles with in-wheel vibration absorbers. Energies, 10(10), 1647.
[15] Shao, X., Naghdy, F., & Du, H. (2017). Reliable fuzzy H∞ control for active suspension of in-wheel motor driven electric vehicles with dynamic damping. Mechanical Systems and Signal Processing, 87, 365-383.
[16] Hu, Y., Li, Y., Li, Z., & Zheng, L. (2021). Analysis and suppression of in-wheel motor electromagnetic excitation of IWM-EV. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 235(6), 1552-1572.
[17] Luo, Y., & Tan, D. (2012). Study on the dynamics of the in-wheel motor system. IEEE transactions on vehicular technology, 61(8), 3510-3518.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Microscopical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded 430 Stainless Steel

Esin Tuğba Şimşek Çelik[a], Başar Ersegün Çelik[b], Şükrü Talaş[c]*

[a]Sivas Cumhuriyet University Hafik Kamer Ornek Vocational School of Higher Education, Department of Transportation Services, Rail Systems Management Program, Sivas/Turkey.
[b]Afyon Kocatepe University, Institute of Natural Sciences, Afyonkarahisar/Turkey.
[c]Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Afyonkarahisar/Turkey.

* **Corresponding Author:** esimsek@cumhuriyet.edu.tr

ABSTRACT

Resistance spot welding is a welding method used to weld sheet metal products, in which metal surface points in contact with each other are joined with the heat obtained from resistance to electric current. This study was carried out to examine the weldability of 430 series stainless steel with argon gas protected and unshielded Spot Resistance Welding method by keeping the welding time and current intensity constant. To reveal the effect of Ar gas protection, tensile testing of the welded samples was performed, and macro images and microstructural analyzes of the weld area were examined. The results showed that gas shielded welding provides better penetration. According to the results obtained from the tensile test, it was seen that the tensile strength of the gas-shielded welded sample was higher than the gas-unshielded sample. According to the microstructural analysis results, it was seen that the grain structure of the weld zone had a smaller grain structure than the base metal.

Keywords: *Argon gas, Resistance spot welding, Stainless steel*

Nokta Direnç Kaynaklı 430 Paslanmaz Çeliğin Mikroskobik ve Mekanik Özellikleri

ÖZET

Nokta Direnç Kaynağı yöntemi, sac metal ürünlerine kaynak yapmak için kullanılan, elektrik akımına dirençten elde edilen ısıyla birbirine temas eden metal yüzey noktalarının birleştirildiği kaynak yöntemidir. Bu çalışma, 430 serisi paslanmaz çeliğin argon gazı korumalı ve korumasız Nokta Direnç Kaynağı yöntemi ile kaynak süresi ve akım şiddeti sabit tutularak kaynaklanabilirliğini incelemek amacıyla yapılmıştır. Ar gazı korumasının etkisini ortaya çıkarmak için kaynaklı numunelerin çekme testi yapılmış, makro görüntüleri ve kaynak bölgesinin mikroyapısal analizleri incelenmiştir. Sonuçlar gaz korumalı kaynağın daha iyi nüfuziyet sağladığını göstermiştir. Çekme testinden elde edilen sonuçlara göre gaz korumalı kaynaklı numunenin çekme mukavemetinin gaz korumasız numuneye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Mikroyapısal analiz sonuçlarına göre, kaynak bölgesinin tane yapısının ana metale göre daha küçük tane yapısına sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Argon Gazı, Nokta Direnç Kaynağı, Paslanmaz Çelik*

I. INTRODUCTION

In recent years, the use of stainless steel materials has steadily increased in various industrial applications [1]. Stainless steel sheets are widely used in ships, kitchen, construction, transportation, etc., due to their high corrosion resistance, beautiful appearance [2], [3] with a reasonable weldability [4]. Ferritic stainless steels are steels that contain high amounts of Cr and carbide builders, usually between 10.5 and 30% instead of Ni, and alloying elements such as Mo, Ti and V, which can make the ferritic structure stable [5]. Ferritic stainless steels are prone to grain growth above 950°C, resulting in low toughness. It is

recommended to weld ferritic stainless steels with low heat input. The resistance spot welding process is widely used for joining low carbon steel components. High-strength low-alloy steel, stainless steel, nickel, aluminum, titanium, and copper alloys are also commercially spot-welded [6], [7].

Alizadeh-Sh et al. [8] aimed to investigate the process-microstructure-performance relationship in resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel. It was found that the microstructure of the fusion zone and the heat affected zone is influenced by different phenomena including grain growth, martensite formation and carbide precipitation. The effects of welding cycle on the mechanical properties of the spot welds in terms of peak load, energy absorption and failure mode are discussed. Onsekiz & Altunpak [9] combined 0.6 mm thick AISI 430 ferritic stainless steel sheet with resistance spot welding using different electrode materials. The hardness and tensile shear load bearing capacity of welded joint was determined and the microstructure of welded samples was also evaluated. The most suitable welding parameters for each electrode material were determined. Bina et al. [10] investigated the effect of weld current on joining capability of austenitic stainless steel (AISI 304) and ferritic stainless steel (AISI 430) sheets with application of resistance spot welding process. Macrostructure, microstructure, microhardness, tensile shear strength, and failure mode of welded materials were evaluated for different weld currents. The values of weld current were 2.5, 3.75, and 5 kA. It was found that when the weld current increased, the nugget size and the weld strength were increased. Two distinct failure modes including interfacial and pullout were observed during tensile shear test. Finally, an adequate weld current was obtained. Badkoobeh et al. [11] discusses the phase changes and mechanical properties of different spot welds formed between AISI 430 stainless steel (FSS) and AISI 321 austenitic stainless steel (ASS).This article addresses the phase evolutions and mechanical properties of dissimilar spot welds formed between AISI 430 stainless steel (FSS) and AISI 321 austenitic stainless steel (ASS). It was revealed that the fusion zone (FZ) microstructure consisted of three phases of ferrite, austenite, and martensite as well as precipitates. The heat-affected zone (HAZ) of 430 FSS had a dual-phase microstructure including coarse ferrite grains and martensite at the ferrite grain boundaries. Also, there are relatively large austenite grains, precipitates, and abundant twins in the HAZ microstructure of 321 ASS.

In this study, the joining of 430 series stainless steel with the dimensions of 120x20x1 mm was performed by the resistance spot welding method. Mechanical tests of the welded samples and microstructure analyzes of the weld zone were carried out.

II. MATERIAL METHOD

2.1. Material and Method

Commercially available 430 series stainless steel sheet with dimensions of 60x20x1 mm was employed In the experimental study. Chemical composition analysis was performed on 430 series stainless steel sheet material, and the result is given in Table 1.

Table 1. Chemical analysis value of 430 Series Stainless Steel

Species	UNS	Weight % ratios						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
430	S43000	0.12	1.0	1.0	16.0-18.0	--	0.04	0.03

As shown in Figure 1, a chamber with 2 gas inlets (bottom and top) with a diameter of 50 mm and a length of 45 mm was made in order to send gas to the welding zone to the resistance spot welding.



Figure 1. The chamber made to send argon gas to the welding zone

Resistance spot welding (RSW) machine with 80 kVA power, having electronic current and time control, equipped with pneumatic compression was used for the study. Resistance spot welding parameters are as follows: 60 kg of electrode compression force; the welding time of 1 second and 40A of weld current. Compression and holding times for joining were kept constant throughout the study. Commercially pure Cu-Cr electrode with a truncated conical tip and a tip diameter of 8 mm was used. The electrodes were smoothed with sandpaper after every five welds in order to avoid the formation of residues due to deformation and heating on the electrode tips. In addition, after every ten welding, the ends of the electrodes were checked with caliper and if the electrode tip diameter size was changed, it was leveled with a file and brought to the required size and geometry. The distance between the electrodes was checked periodically.

2.2. Preparation and Joining of Test Samples for Welding

Specimens with a thickness of 1 mm, a width of 20 mm and a length of 60 mm were joined by RSW with and without Argon shielding gas. The welding position and dimensions of the prepared samples are shown in Figure 2. Before welding operation, the surfaces of the samples has been cleaned from substances that may adversely affect the weld such as dirt, rust, oil, etc. with fine sandpaper.

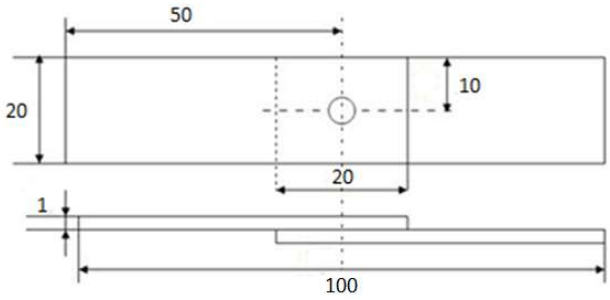


Figure 2. Dimensions and welding position of test specimens

2.3. Mechanical Tests and Metallographic Examinations Applied to Joints

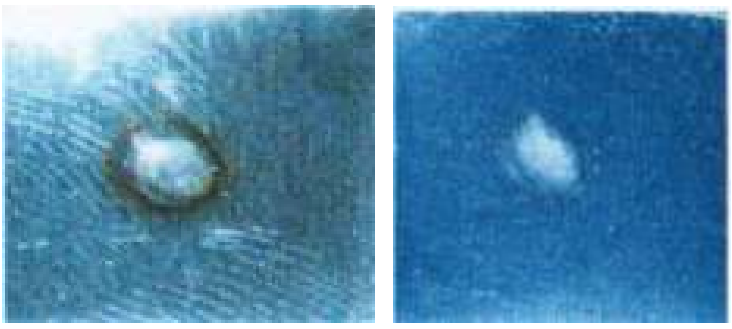
RSW specimens were sliced from the weld zone for metallographic examination using a precision cutting saw with an abrasive cutter for stainless steels. The sliced samples were molded into resin to be examined under a microscope, and then the samples were subjected to sanding and polishing. For stainless steels, 1 unit of HNO_3, 2 units of HCl and 1 unit of distilled water were used as etching agent. After etching the samples, microstructure images were obtained using a digital camer. In addition, for the tensile test, 3 tensile test specimens of 100x20x1 mm in size for each RSW condition and without welding were prepared.

III. RESULTS

In this study, tensile test was applied to test samples in order to examine the weldability of 430 series stainless steels with resistance spot welding (RSW) method under argon gas shielding and without gas shielding, keeping the welding time and current intensity constant. The effects on the tensile load carrying capacity and microstructure of the joints made under the specified conditions, using argon gas and without gas shielding, were experimentally investigated in terms of their weldability.

3.1. RSW Nugget Size

Weld nugget size is one of the parameters that determine the spot resistance weld quality. Weld quality and strength are estimated by measuring weld nugget size and weld penetration. Images of weld nugget obtained in this study are shown in Figure 3a-b. In the study, using argon gas and without gas shielding, the obtained weld nugget dimensions and penetration were found to be acceptable. In spot welds made without gas protection; there is coloration in the weld area, that is oxidation, but it is seen that this coloration does not exist in gas shielded spot welds. It should be considered that the similar effect will be on the sheet interfaces as well. Therefore, lower weld strength is likely to be observed with the notch effect due to oxidation during the tensile test or at the sheet-sheet interface of gas unprotected samples.

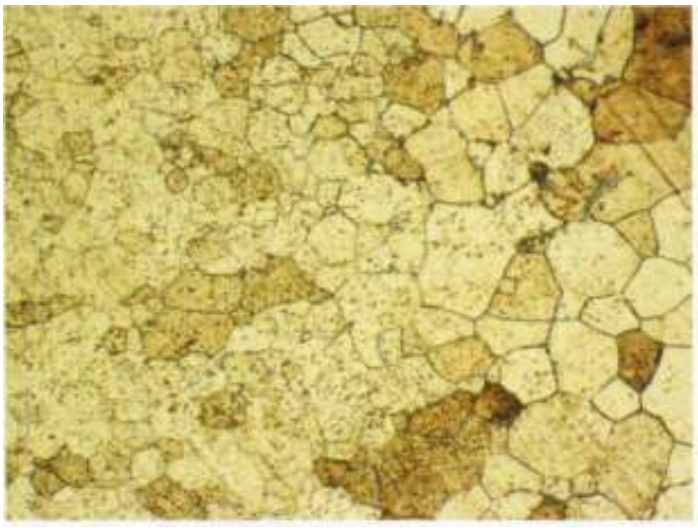


a) b)

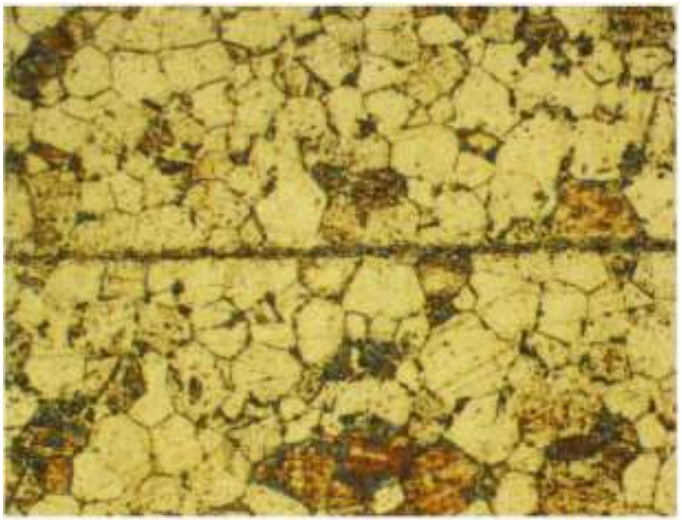
Figure 3. Macro images of spot welds, a) 430 without Ar, b) 430 with Ar

3.2. Metallographic Examination

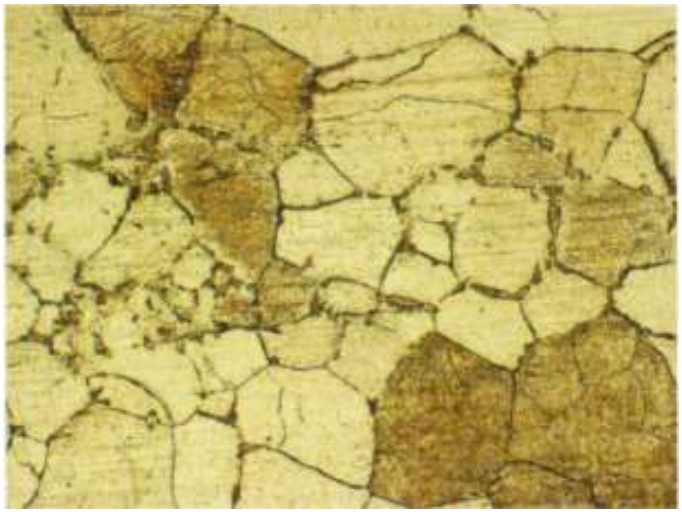
Microstructure picture of 430 series base metal in Figure 4a, microstructure picture of 430 series with and without gas shield weld zones are given in Figure 4b and c. AISI 430 stainless steel is a non-hardenable ferritic steel and it consists of equiaxed grains with no intra-grain morphology. The grain boundaries are empty and there is no indication of carbide formation, however, the grain refinement is obvious in Figure 4 a. The welding zones of spot welds without and with Ar gas are given in Figure 4b and 4c. The junction of 430 stainless steel spot welds made without Ar gas shows a definitive line of weld and due possibly to oxidised surface which happened to be result of high temperature during the spot welding operation. On the other hand, even at high magnification, the weld zone of spot weld with Ar gas shroud shows no definitive line of spot weld. The spot line is free from oxidised surface remains however grain boundaries are more apparent and dark coloured objects exist on the grain boundaries in the form of discontinous and seperate blocks less similar to grain boundaries as in spot welds without Ar gas protection in Figure 4b.



a)



b)

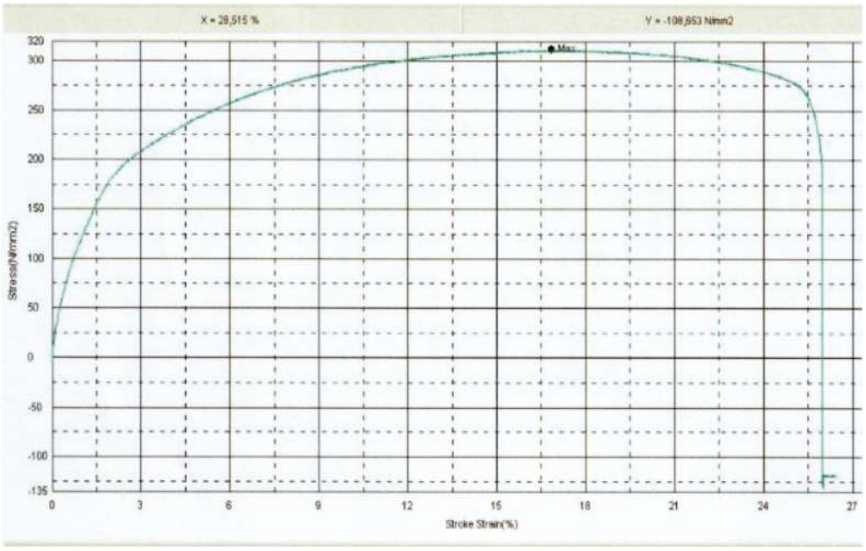


c)

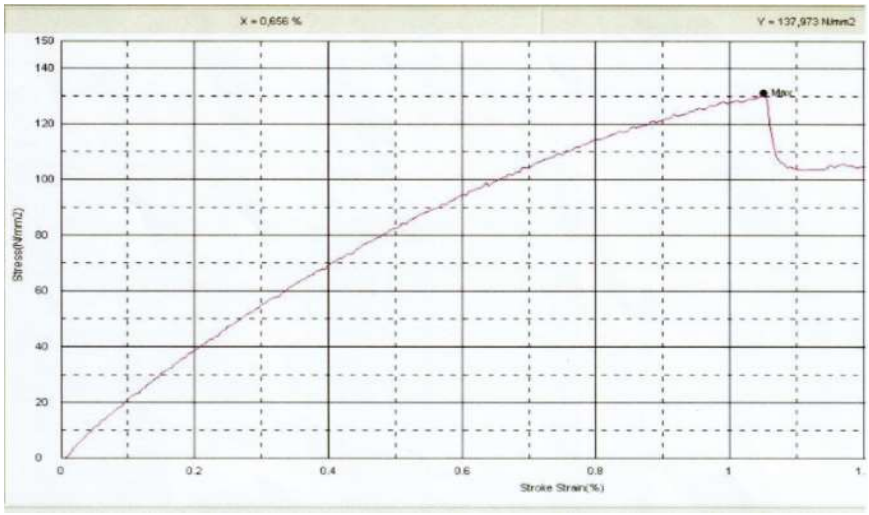
Figure 4. a) Base metals, b) welded without Ar and c) welded with Ar

3.3. Mechanical Test Results

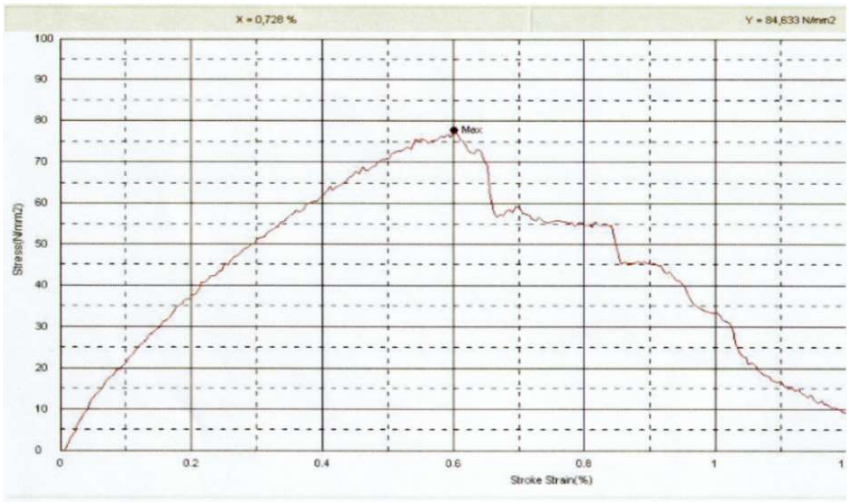
The tensile strength, which is one of the parameters that determine the resistance spot welding quality, was determined by applying the tensile test in a static universal tensile test device. As a result of the tensile test, the tensile diagram of the unwelded sample for 430 series stainless steel is in Figure 5a, the tensile diagram of the sample welded under argon gas protection is in Figure 5b and the tensile diagram of the sample welded without shielding gas Figure 5c is also shown. According to the force-elongation curves showing the tensile load carrying capacities in the tensile diagrams, the base metal sample has a high elongation value and do not show significant yield point on the force-elongation graph, but significant yield points are also not observed in the welded samples. The maximum tensile strength values of the welded samples are lower than that of base metal. In both welded samples, the ductility decreases drastically and it is more brittle compared to the base metal, as it fails without showing a yield point. The difference between with and without Ar gas protection is clearly observed in Figures 5b and c such that the spot weld with Ar shows more elongation compared to spot welds without Ar gas protection as it may be a result of irregularities in weld zone. It can be concurred that such defects at the weld interfaces are strongly linked to lower tensile strength of spot welds given in Figures 5a and b. The presence of oxidised surface results in lower tensile strength but the reason for lower strength of spot welds are possbily linked to the presence of carbide like formations in grain boundaries, which were observed in base metal grain boundaries.



a)



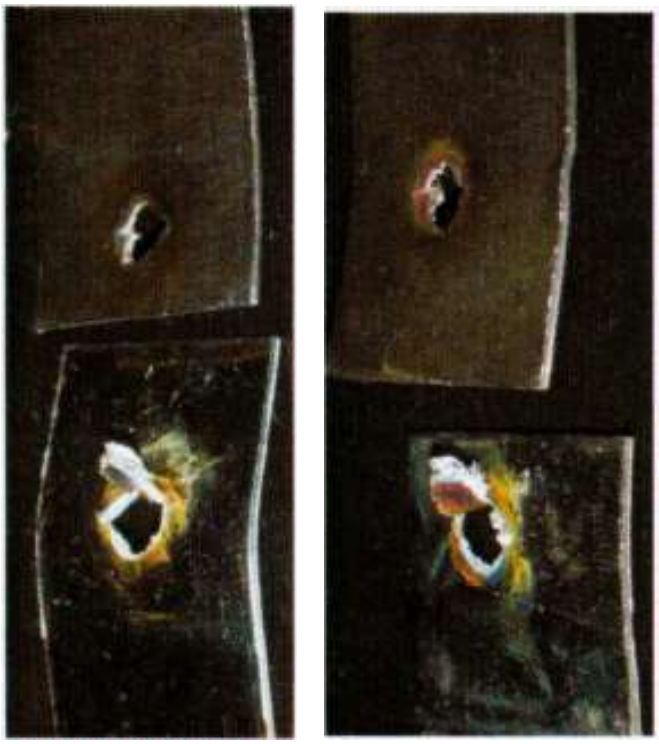
b)



c)

Figure 5. a) Tensile Diagram for Series 430 Stainless Steel, b) Tensile Diagram for Series 430 Stainless Steel with Argon, c) Tensile Diagram for Series 430 Stainless Steel without Argon.

The images of the tensile tested welded samples with and without Ar gas shielding are shown in Figure 6a and b. The macro images of the test specimens show that both welded specimens were damaged by tearing from the base metal area and are practically suitable specimens as the images do not show and directional preference on damaged area but weld zone was pulled out in a single piece.



a) b)

Figure 6. a) Argon gas shielded welded b) Gas unshielded welded tensile test specimens

IV. DISCUSSION

This study was carried out to examine the weldability of 430 series stainless steel with argon gas protected and unprotected Resistance Spot Welding method by keeping the welding time and current intensity constant. Thus, the results of Resistance Spot Welding of 430 stainless steel, which is a ferritic stainless steel, with and without Ar gas protection, were compared and it was determined that its weldability was better when Ar gas was used.

The importance of the weld core size resulting from Ar gas protected and unprotected Resistance Spot Welding of 430 stainless steel in terms of weld quality has been observed. It has been determined that oxidation is related to coloration in the weld area without Ar gas protection, therefore oxidation creates a notch effect and negatively affects tensile strength and ductility. It has been found that samples welded with or without Ar gas shielding in Resistance Spot Welding have lower tensile strength and lower ductility than the base metal. On the other hand, more elongation was observed in Ar gas shielded welding.

It was found that 430 stainless steel, a ferritic steel, affects the grain and grain boundaries in the comparison of Resistance Spot Welding process with and without Ar gas protection. It has been found that oxidation occurring in the welding process without Ar gas protection affects the microstructure images.

Based on all these results, it is thought that this study will be a reference for future more comprehensive studies, especially regarding Resistance Spot Welding of Ferritic Stainless Steels. It is also thought to be a guide in practice for Resistance Spot Welding of Ferritic Stainless Steels used in industry.

V. CONCLUSION

The general findings of this study can be summarized as follows;

- In welding without Ar gas, coloration was observed in the weld area, and this is due to oxidation. In welding made with Ar gas, no coloration was observed on the upper surface. However, in both welds, oxidation was observed in the region between the sheets, and the amount of oxidation in the welding made in the Ar gas atmosphere is very low. It is thought that this situation is due to the fact that Ar gas does not penetrate between the sheet metals.
- In welding without Ar gas, the joint shows a precise weld line. The reason for this is the oxidized surface formed between the sheet metals as a result of high temperatures. In welding made with Ar gas, a clear weld line is not observed due to the very small oxidized surface and the effect of Argon on the penetration depth.
- Grain shrinkage compared to the main material was observed due to the effect of heat input in the welding area.
- No significant yield point was observed in the strenght-elongation graph of the welded samples, and the samples were torn and broke.
- The maximum tensile strength of welded samples is lower than the base metal, and both samples have less ductility and are more fragile than the base metal.
- It has been observed that welding made in Argon atmosphere shows more elongation than welding not made in Argon atmosphere.
- It has been observed that increased oxidized surface results in lower tensile strength and lower ductility.

REFERENCES

[1] A.E. Reiter, B. Brunner, M. Ante, J. Rechberger. "Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel," *Surf Coat Tech*, 200, 18–19, 5532-41, 2006.

[2] H.B. Carry. "Modern welding technology," *NJ (USA): American Welding Society*, 2nd ed., 497– 498, 1981.

[3] B. Gülenç, K. Develi, N. Kahraman, A. Durgutlu. "Experimental study of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in MIG welding of austenitic stainless steel," *Int J Hydrogen Energ*, 30, 13–14, 1475–81, 2005.

[4] W-S. Lee, J-I. Cheng, C-F. Lin. "Deformation and failure response of 304L stainless steel SMAW joint under dynamic shear loading," *Mater Sci Eng A*, 381, 1–2, 206–15, 2004.

[5] T. Osmanoğlu. "The effects of cold deformation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AISI 304 and 430 stainless steels," *Master Thesis*, Istanbul University Institute of Science and Technology, 2012.

[6] M. Jou. "Real time monitoring weld quality of resistance spot welding for the fabrication of sheet metal assemblies," *J Mater Process Tech*, 132, 102–13, 2003.

[7] N. Kahraman. "The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets," *Mater Design*, 28, 2, 420–7, 2007.

[8] M. A. R. A. S. H. I. Alizadeh-Sh, S. P. H. Marashi, M. Pouranvari. "Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: phase transformations and mechanical properties," *Materials & Design*, 56, 258-263, 2014.

[9] M. Onsekiz, Y. Altunpak. "Effect of electrode materials type on resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel," *In International Journal of Engineering Research in Africa,* 31, 53-58, 2017.
[10] M.H. Bina, M. Jamali, M. Shamanian, H. Sabet. "Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 1371-1379, 2014.
[11] F. Badkoobeh, H. Mostaan, M. Rafiei, A. Bakhtiari. "A study on phase evolutions and tensile-shear performance of dissimilar resistance spot welds formed between AISI 430 ferritic stainless steel and AISI 321 austenitic stainless steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-15, 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Dubleks Paslanmaz Çelikte Sigma ve Chi Fazlarının Mikroyapısal Karakterizasyonu

Özge ARARAT[a], Mutlu Çağrı YİĞİT[ax], Ersoy ERİŞİR[a]

[a]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar: mutlucagriyigit@gmail.com**

ÖZET

Dubleks paslanmaz çelikler yüksek mekanik özellik, kaynaklanabilirlik ve korozyon direncine sahip olmaları sayesinde kimya, petrokimya, nükleer ve denizcilik endüstrilerinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Dubleks paslanmaz çeliklerde hem ferrit yapıcı Cr ve Mo ile birlikte hem de östenit yapıcı Ni ve Mn gibi çeşitli alaşım elementleri bulunmaktadır. Yüksek oranda alaşım elementi içermeleri nedeniyle dubleks paslanmaz çeliklerde bazı ikincil fazların çökelmesi görülebilmektedir. Sigma ve chi gibi intermetalik fazlar dubleks paslanmaz çeliklerin tokluk ve korozyon direncini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu çalışmada vakum indüksiyon ergitme yöntemi ile üretilen döküm konumundaki Fe-Cr-Mn esaslı dubleks paslanmaz çeliğinde homojenizasyon ve sıcak haddeleme işlemleri uygulanması sonrası mikroyapısal incelemesi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu ve EDS analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Homojenizasyon tavlaması sonrasında mikroyapıda sigma ve chi fazları tespit edilmiştir. Sıcak haddeleme 900-1050 °C sıcaklık aralığında uygulanmıştır. Sıcak haddeleme işlemi sonrasında intermetalik fazlar gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: *Dubleks Paslanmaz Çelik, Faz Dönüşümleri, İntermetalik Faz, Mikroyapısal Karakterizasyon*

ABSTRACT

Duplex stainless steels have wide application areas in chemical, petrochemical, nuclear, and marine industries due to their high mechanical properties, weldability, and corrosion resistance. Duplex stainless steels contain various alloying elements such as Cr and Mo as ferrite stabilizers and also Ni and Mn as austenite stabilizers. Due to their high content of alloying elements, precipitation of secondary phases can occur in duplex stainless steels. Intermetallic phases such as sigma and chi significantly reduce the toughness and corrosion resistance of duplex stainless steels. In this study, homogenization and hot rolling were applied to Fe-Cr-Mn based duplex stainless steel in as-cast condition produced by vacuum induction melting. Microstructural characterization was performed by light microscope, scanning electron microscope, and EDS analyses. Sigma and chi phases were detected in the microstructure after the homogenization annealing. Hot rolling was applied in the temperature range of 900-1050 °C. Intermetallic phases were not observed after hot rolling.

Keywords: *Duplex Stainless Steel, Phase Transformation, Intermetallic Phases, Microstructural Characterization*

I. GİRİŞ

Ferrit ve östenit fazlarını içeren dubleks paslanmaz çelikler yüksek mukavemet, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahiptirler. Bu sayede kimya, petrokimya, nükleer ve denizcilik endüstrilerinde yaygın kullanım alanı bulmaktadırlar ([1], [2]). Dubleks paslanmaz çeliklerde 300-1100 °C sıcaklık aralığında intermetalikler (sigma, chi, Laves), nitrürler, karbürler ve Widmanstatten östenit meydana gelebilmektedir ([3], [4], [5], [6]). Widmanstatten östenit 700-1100 °C sıcaklık aralığında delta ferrit tane sınırlarında oluşmakta olup tane içine doğru büyümektedir. Delta ferrit tane sınırlarında oluşabildiği gibi doğrudan delta ferrit tane içinde de Widmanstatten östenit oluşabilmektedir. Widmanstatten östenit morfolojisi nedeniyle uzama ve darbe tokluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu

nedenle mikroyapıda istenmemektedir ([7], [8]). Ayrıca, sigma ve chi intermetalikleri 600-1000 °C sıcaklık aralığında meydana gelmektedir. Bu intermetalikler çeliğin sertliğini arttırmakla birlikte uzama, tokluk ve korozyon direncini olumsuz yönde etkilemektedir. İntermetalik fazların oluşumu matrisin krom, molibden gibi alaşım elementlerince fakirleşerek tokluk ve korozyon direncinin düşmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda mikroyapıda sigma miktarının artması kırılma tipini tane içi kırılmadan tane sınırı kırılma tipine dönüştürmektedir ([9], [10], [11], [12], [13]).

Bu çalışmada Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo dubleks paslanmaz çelikte sigma ve chi fazlarının mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ingotun döküm yapısında bulunan Widmanstatten östenitin çözünmesini sağlamak amacıyla homojenizasyon tavlaması uygulanmıştır. ThermoCalc yazılımı kullanılarak homojenizasyon tavlama sıcaklığı belirlenmiş ve oluşabilecek faz tipleri öngörülmüştür. Homojenizasyon tavlaması sonrasında ışık mikroskobu (IM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımı X-ışını spektroskopi (EDS) analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda sigma ve chi intermetalikleri tespit edilmiştir. Homojenizasyon tavlamasının ardından sıcak haddeleme ile şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Homojenizasyon tavlaması ve haddeleme işlemleri sırasında oluşan faz dönüşümleri sonucunda Widmanstatten östenit morfolojisinin değişmesi ile birlikte sigma ve chi intermetalik fazlarının çözündüğü tespit edilmiştir.

II. Materyal Metot

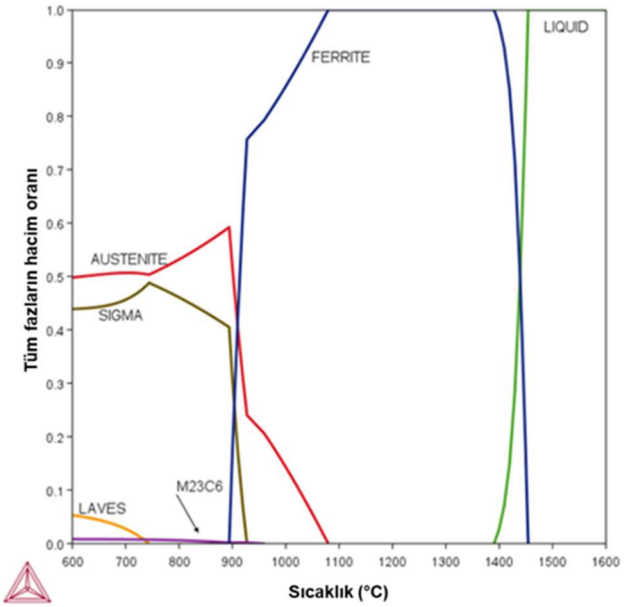
Bu çalışmada Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel çelik vakum altında indüksiyonla ergitme yöntemiyle üretilmiştir. Öncelikle ışık mikroskobu ile ingotun döküm yapısı incelenmiştir. Döküm yapısının incelenmesinin ardından 1200 °C'de 48 saat süre ile homojenizasyon tavlaması uygulanmıştır. Homojenizasyon tavlaması sonrasında ingot 40 K/dk soğuma hızıyla oda sıcaklığına soğutulmuştur. Homojenizasyon tavlamasının ardından sıcak haddeleme ile şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm, homojenizasyon ve şekillendirme işlemleri sonrasında numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Zımparlama ve parlatma işlemlerinin ardından Beraha ll dağlayıcısı ile numuneler dağlanmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu ve EDS analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu

Element	**C**	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Fe**
Ağırlık (%)	0.043	14.05	0.16	20.25	2.08	3.36	Kalan

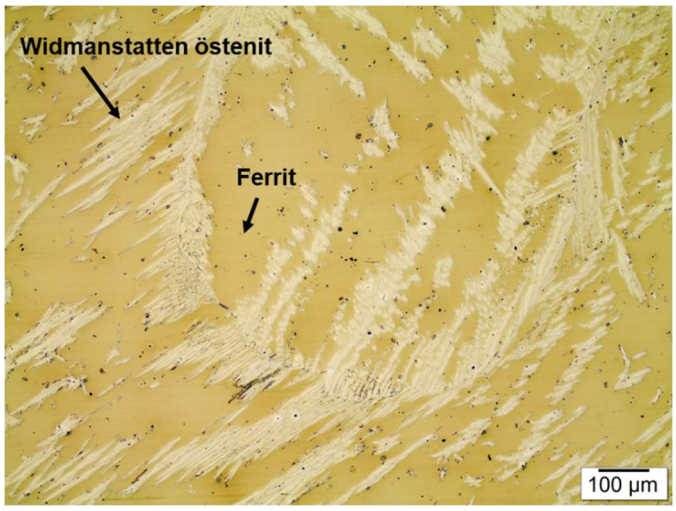
III. Sonuçlar

Homojenizasyon tavlamasından önce ThermoCalc yazılımı kullanılarak Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış faz oranları belirlenmiştir. Şekil 1'de Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış denge durumunda faz miktarlarını gösteren bir diyagram verilmiştir. Diyagram incelendiğinde ergimenin 1390 °C sıcaklıkta başladığı görülmektedir. Sıvı fazdan ilk olarak δ-ferrit oluşmaktadır. Katılaşma esnasında sırasıyla δ-ferrit, östenit, $M_{23}C_6$, sigma ve Laves fazlarının oluşabileceği öngörülmektedir. Hesaplamalara göre 1080-1390 °C sıcaklık aralığında δ-ferrit tek faz bölgesi bulunmaktadır. 1080 °C altındaki sıcaklıklarda östenit fazı oluşmaya başlamaktadır. Bu nedenle, Widmanstatten östenit fazının çözünmesini sağlamak için homojenizasyon tavlaması bu sıcaklığın üzerindeki 1200 °C'de uygulanmıştır.



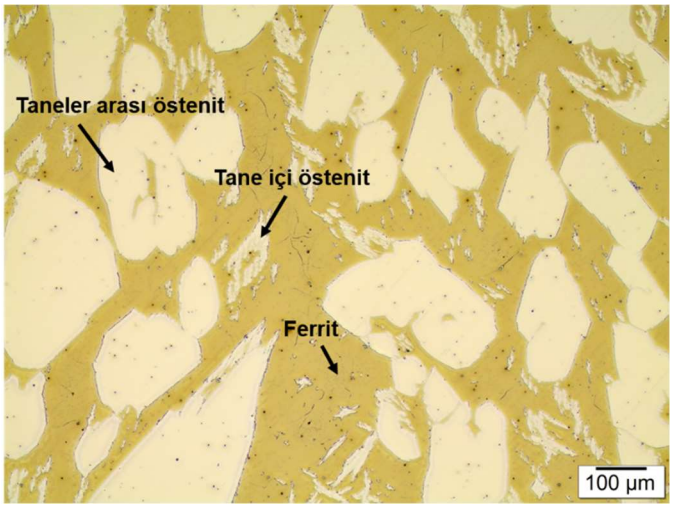
Şekil 1. Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo alaşımının hesaplanmış denge diyagramı

Şekil 2'de döküm yapısının ışık mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Mikroyapı görüntülerindeki koyu kontrastlı bölgeler delta ferriti, açık kontrastlı bölgeler ise Widmanstatten östenit yapısını göstermektedir. Katılaşma esnasında delta ferrit tane sınırlarında Widmanstatten östenit oluşmuş ve tane içine doğru ilerlemiştir.



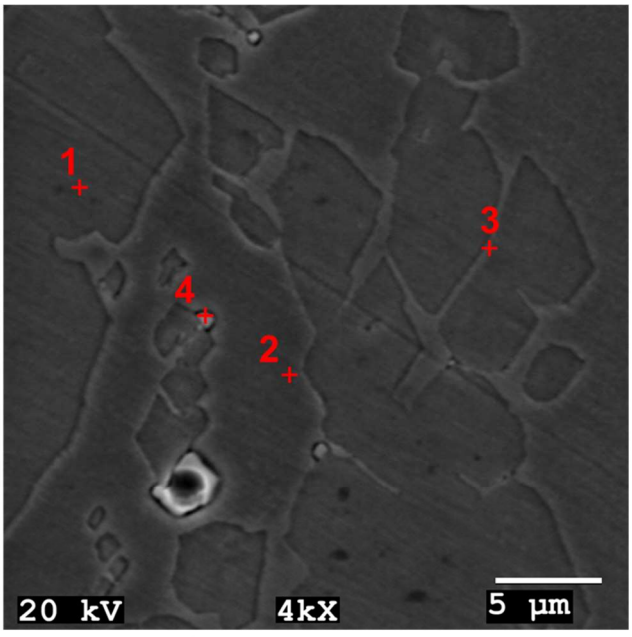
Şekil 2. Döküm durumunda alınan numunenin IM görüntüsü

Widmanstatten östenit morfolojisi nedeniyle darbe çatlaklarının ilerlemesini kolaylaştırır ve buna bağlı olarak da darbe tokluğu ve uzama değerlerini düşürmektedir [8]. Bu nedenle Widmanstatten östenitin çözünmesini sağlamak ve morfolojisini değiştirmek amacıyla homojenizasyon tavlaması uygulanmıştır. Homojenizasyon tavlaması 1200 °C'de 48 saat süre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te homojenizasyon işlemi sonrasına ait ışık mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Işık mikroskobu incelemelerinde Widmanstatten östenitin taneler arası ve tane içi östenite dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 3. Homojenizasyon tavlaması sonrası mikroyapıya ait IM görüntüsü

Işık mikroskobu incelemelerinden sonra homojenizasyon tavlaması numunelerinde SEM görüntüleme ve EDS analizi yapılmıştır. Şekil 4'te homojenizasyon tavlaması sonrasına ait SEM mikroyapı görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde tane içi östenit tanelerinin sınırlarında sigma fazının oluştuğu görülmektedir. Sigma fazına göre daha küresel morfolojide olan chi fazının ise delta ferrit ile tane içi östenit sınırlarında ve delta ferrit içinde oluştuğu tespit edilmiştir. Homojenizasyon tavlaması sonrasında İntermetalik fazların yavaş soğuma hızından dolayı oluştuğu öngörülmektedir.

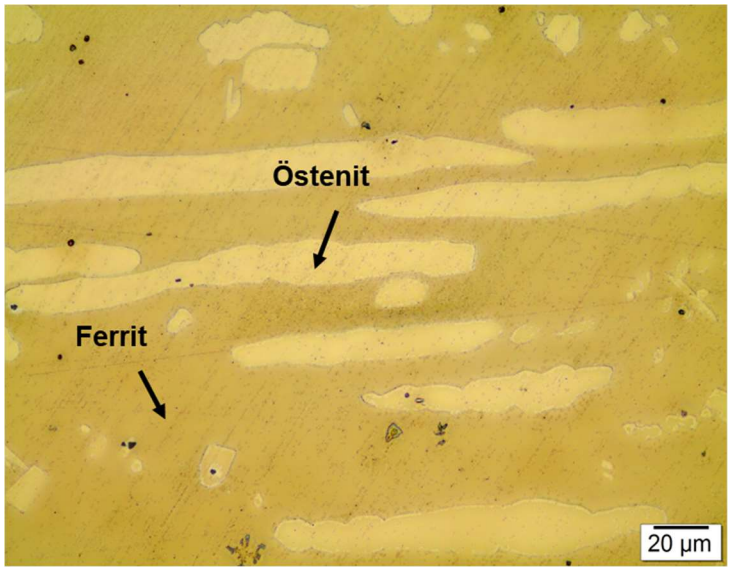


		Element (%)				
	Faz	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
1	Ferrit	20.2	12.4	2.2	6.5	Kalan
2	Tane içi östenit	19.2	13.5	2.4	4.8	Kalan
3	Sigma	21.6	10.9	1.5	8.3	Kalan
4	Chi	21.2	12.9	1.7	11.1	Kalan

Şekil 4. Homojenizasyon tavlaması sonrası mikroyapıya ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları

Homojenizasyon tavlamasının ardından sıcak şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Sıcak şekillendirme işleminde sırası ile yeniden ısıtma, sıcak haddeleme ve hızlı soğutma aşamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil

4'te sıcak haddeleme işlemi sonrası ışık mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Sıcak haddeleme işleminde deformasyon etkisiyle östenit adalarının hadde yönünde uzadığı görülmektedir. Bununla birlikte, sıcak haddeleme işlemlerinde haddelenen plakanın doğal soğumasından dolayı çelik tekrarlı olarak 1100 °C gibi yüksek bir sıcaklığa ısıtılmış ve ardından hızlı soğutma yapılmıştır. Bu süreçte sigma ve chi fazlarının çözündüğü saptanmıştır.



Şekil 5. Sıcak haddeleme sonrası IM görüntüsü

Tartışma

Bu çalışmada dubleks paslanmaz çelikte sigma ve chi fazlarının karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılmış olan çeliğin döküm yapısının delta ferrit ve Widmanstatten östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir. Homojenizasyon sonrasında Widmanstatten östenitin morfolojisi değişerek tanelerarası ve taneiçi östenite dönüştüğü görülmüştür. Ancak homojenizasyon tavlaması sonrasında sigma ve chi intermetalik fazlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu intermetalik fazların mikroyapısal karakterizasyonu IM ve SEM incelemeleri ile birlikte EDS analizleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Homojenizasyon tavlamasının ardından sıcak haddeleme işlemi ile şekillendirme kademesi tamamlanmıştır. Sıcak haddeleme esnasında tekrarlı olarak yüksek sıcaklıklara çıkılmış ve hızlı soğutma yapılmıştır. Bunun neticesinde sigma ve chi fazlarının çözündüğü görülmüştür. Nihai mikroyapının delta ferrit ve östenitten oluştuğu tespit edilmiştir.

IV. ÇIKARIM

Bu çalışmada, Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo dubleks paslanmaz çelikte sigma ve chi fazlarının mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bulgular, homojenizasyon tavlaması ve sıcak şekillendirme işlemlerinin paslanmaz çelikteki mikroyapı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Deneysel çeliğin döküm yapısı incelendiğinde Widmanstatten östenit yapısı gözlenmiştir. Bu yapının çözünmesi amacıyla homojenizasyon tavlaması uygulanmıştır. Homojenizasyon tavlaması sonrası östenit morfolojisi Widmanstatten östenitten tanelerarası ve tane içi östenite dönüşmesine rağmen, sigma ve chi intermetalik fazları oluşumu tespit edilmiştir. Homojenizasyon sonrası uygulanan sıcak şekillendirme işlemlerinde sürekli yüksek sıcaklığa ısıtma ve hızlı soğutma neticesinde bu intermetalik fazların çözündüğü görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] G. Chail and P. Kangas. "Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties and applications," *Procedia Structural Integrity 2,* 1755-1762, 2016.

[2] M. Knyazeva, M. Pohl. "Duplex steels: part l: genesis, formation, structure," *Metallography, Microstructure, and Analysis,* 2, 113-121, 2013.

[3] J.L. DEL Abra-Arzola, M. A. Garcia-Renteria, V.L. Cruz-Hernandez, J. Garcia-Guerra, V.H. Martinez-Landeros, L.A. Falcon-Franco, F.F. Curiel-Lopez. "Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205," *Wear*, 400-401, 43-51, 2018.

[4] B. Zhang, Z. Jiang, H. Li, S. Zhang, H. Feng, H. Li. "Precipitation behavior and phase transformation of hyper duplex stainless steel UNS S 32707 at nose temperature," *Materials Characterization.* 129, 31-39, 2017.

[5] J.W. Elmer, T.A. Palmer, E.D. Specht. “In situ observations of sigma phase dissolution in 2205 duplex stainless steel using synchrotron X-ray diffraction,” *Materials Science and Engineering A,* 459, 151-155, 2007.
[6] D.M. Escriba, E. Materna-Morris, R.L. Plaut, A.F. Padilha. “High-speed digital-to-RF converter,” *Materials Characterization,* 60, 1214-1219, 2009.
[7] Y. Ohmori, K. Nakal, H. Ohtsubo, Y. Isshiki. “Mechanism of widmanstatten austenite formation in a δ/ϒ duplex phase stainless steel,” *ISIJ International,* 35, 969-975, 1995.
[8] X.H. Wu, Z.G. Song, J.G. He, H. Feng, B.S. Wang, M.H. Wu. “Effect of newly formed Widmanstatten austenite during high temperature cooling on mechanical properties in UNS S32750 duplex stainless steel,” *Materials Science and Engineering A*, 851, 143654, 2022.
[9] S.K. Bonagani, K. Chandra, K.V. Ravikanth, H. Donthula, S. Roychowdhury, V. Kain. “ Sigma phase precipitation and growth in solution annealed 321 stainless steel during thermal aging: effects on toughness & intergranular corrosion,” *Materials Science and Engineering A*, 888, 145763, 2023.
[10] C. Gennari, L. Pezzato, E. Piva, R. Gobbo, I. Calliari. “Influence of small amount and different morphology of secondary phases on impact toughness of UNS S32205 duplex stainless steel,” *Materials Science and Engineering A*, 729, 149-156, 2018.
[11] Z. Liu, Y. Xie, X. Chu, L. Zhang, W. Zhao, C. Zhao, H. He. “Evolution of the sigma phase and its effect on the corrosion resistance of ASTM A890 3A duplex stainless steel,” *Materials Today Communications* 36, 106926, 2023.
[12] Q. Sun, J. Wang, H. Li, Y. Li, Y. Hu, J.G. Bai, P. Han. “ Chi phase after short-term aging and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel,” *Journal of Iron and Steel Research, International* 23(10), 1071-1079, 2016.
[13] N.L. Isern, H. Lopez-Luque, I. Lopez-Jimenez, M.V. Biezma. “ Identification of sigma and chi phases in duplex stainless steel,” *Materials Characterization* 112, 20-29, 2016.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

AL7075 T6 ALAŞIMININ ÇEVRESEL FREZELENMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Neslihan Akdemir[a], Selçuk Yağmur[b]*

[a]Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara/Türkiye.
[b]Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.

***Sorumlu Yazar:** neslihanucler@outlook.com*

ÖZET

Alüminyum doğada en çok bulunan elementlerden biri olup, hafiflik, mukavemet, üstün korozyon direnci, yüksek derecede ısı ve elektrik iletkenliği, ısıl işlem yapılabilirliği gibi özelliklere sahip olması sebebiyle özellikle havacılık, savunma ve otomotiv gibi alanlarda yoğunlukla kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının bu avantajlarının yanında bazı işlenebilirlik problemleri mevcuttur. En önemli işlenebilirlik problemlerinden birisi yığıntı talaş oluşumudur (YT). Bu çalışmada Alüminyum 7075 T6 alaşımının çevre frezelemesinde meydana gelen kesme kuvvetleri incelenmiştir. Çalışmada iki farklı takım kullanılmıştır. Takımlardan birisi düz parmak freze iken diğeri köşe yuvarlatmasına sahiptir. Kesme parametreleri olarak 3 farklı ilerleme miktarı (0.2 mm/dev, 0.25 mm/dev, 0.3 mm/dev) ve 3 farklı kesme hızı (300 m/dak, 350 m/dak,400 m/dak) seçilmiştir. Deney sonrasında elde edilen kesme kuvvetleri incelendiğinde; En küçük kesme kuvveti 761 N değeri ile köşe yuvarlatmasına sahip takımda takımında, 300 m/dak kesme hızı, 0.2 mm/dev ilerlemede meydana geldiği görülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise 1300 N değeri olarak düz parmak frezede 400 m/dak kesme hızı ve 0.3 mm/dev ilerleme miktarında ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Al 7075, frezeleme, kesme kuvveti, parmak freze*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON CUTTING FORCES IN PERIPHERAL MILLING OF AL7075 T6 ALLOY

Neslihan Akdemir[a], Selçuk Yağmur[b]*

[a] Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, Ankara/Türkiye.
[b] Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara/Türkiye.
* **Corresponding Author:** neslihanucler@outlook.com

ABSTRACT

Aluminum is one of the most abundant elements in nature and is used extensively in areas such as aviation, defense and automotive due to its properties such as lightness, strength, superior corrosion resistance, high heat and electrical conductivity, and heat treatability. In addition to these advantages of aluminum alloys, there are some machinability problems. One of the most important machinability problems is Built-Up Edge formation (BUE). In this study, the cutting forces occurring in peripheral milling of Aluminum 7075 T6 alloy were examined. Two different teams were used in the study. One of the tools is a straight end mill while the other has corner rounding. 3 different feed rates (0.2 mm/rev, 0.25 mm/rev, 0.3 mm/rev) and 3 different cutting speeds (300 m/min, 350 m/min, 400 m/min) were selected as cutting parameters. When the cutting forces obtained after the experiment are examined; It was observed that the smallest cutting force, with a value of 761 N, occurred in the tool with corner rounding, at a cutting speed of 300 m/min and a feed of 0.2 mm/rev. The highest cutting force was measured as 1300 N on a flat end mill at a cutting speed of 400 m/min and a feed rate of 0.3 mm/rev.

Keywords: *Al 7075, milling, cutting force, end mill*

1.GİRİŞ

Alüminyum, Dünya'da en çok bulunan üçüncü elementtir. Alüminyum kolayca diğer kimyasal elementlerle bileşikler oluşturduğundan çok çeşitli alaşımlar geliştirilmiştir. Çok az miktarda alüminyum bile metalin özelliklerini büyük ölçüde değiştirerek, yeni alanlarda kullanılmasına olanak tanımaktadır[1].

Çeliğe göre daha düşük mukavemet değerlerine sahip olan alüminyum, içerisine ilave edilen alaşım elementleri ile mukavemet değerlerinde ve fiziksel özelliklerinde kayda değer artışlar elde edilmekte, ayrıca alüminyumun yoğunluğundaki artışın sınırlı olması sayesinde de kullanım alanı arttırılmaktadır[2]. Alüminyum Alaşımları hafif, korozyon dayınım yüksekliği, elektrik iletkenliği, özgül mukavemet gibi özellikleri dolayısıyla endüstriyel malzemeler olup ulaşım, mimari, endüstriyel alanlar, havacılık, inşaat sektörü, elektrik ve elektronik alanlarında yaygın kullanıma sahiptirler[3].

Alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğini, işleme şartları ve malzemenin metalürjik yapısının değiştirdiği bilinmektedir. Alüminyum alaşımları işlendiğinde geniş bir talaş, takım temas alanı oluşturur ve talaş kalınlığı oranı yüksektir; bu durum dolayısıyla kesme kuvvetlerinin, işleme gücünün, ısı üretiminin artmasına katkıda bulunur ve uzun, lifli talaşlar oluşturduğu gibi yüzey kalitesinin de düşük olmasına sebep olur[4].

Sünek malzemelerden biri olan alüminyum işlenebilirliğinde görülen en büyük problemlerden biri yığıntı talaş oluşumudur. Yığıntı talaş oluşumunu engellemek amacıyla talaşlı imalatta çeşitli yöntemler mevcuttur. Talaş kaldırma esnasında kullanılan kesici takımın malzemesi ve geometrisi ile kesme parametreleri yığıntı talaş oluşumunda önemli rol oynamaktadır[5].Talaş kırıcıya sahip takımlar kullanmak, kesme parametrelerini değiştirmek ve kesici takım geometrisi yığıntı talaş oluşumunu önlemek için önemli faktörlerdir.

Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde yaşanan sorunların önüne geçilebilmek için çok sayıda çalışmaya literatürde rastlanmaktadır. Yapılan çalışmaların bazılarına aşağıda yer verilmiştir.

Devsingh, Alüminyum alaşımı 7075'in iş mili hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği parametrelerini değiştirerek takım ömrünü artırmak için deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için en uygun parametreler iş mili hızı 3000 dev/dak, ilerleme hızı 300 mm/dak ve kesme derinliği 0,4 mm olduğunu, yüksek talaş kaldırma oranları elde etmek için en uygun parametreler iş mili hızı 2500 dev/dak, ilerleme hızı 400 mm/dak ve kesme derinliği 0,5 mm olduğunu tespit etmişlerdir[6].Nguyen ve arkadaşları, AL 6061 kullanmışlardır.Farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme değerlerinde deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Takım aşınması üzerinde en fazla etkiye sahip olan parametrenin kesme hızı, takım aşınması üzerinde ikinci etki derecesine sahip olan parametrenin ilerleme hızlı olduğunu bildirmişlerdir. Kesme derinliğinin takım aşınması üzerinde ihmal edilebilir etkisi olduğunu iletmişlerdir. İlerleme hızı ve kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [7].Pimenov ve arkadaşları, alüminyum alaşımları incelemişlerdir. Alüminyum alaşımları işlerken takım aşınması, çelik gibi diğer metalleri işlerken önemli ölçüde daha düşük olduğunu tespit etmişler ve bu gözlem öncelikle alüminyum alaşımlarının çelikten daha düşük mukavemete ve daha fazla sünekliğe sahip olması ve bunun sonucunda benzer kesme koşullarında takım aşınma oranlarının en az %30-40 daha düşük olmasıyla açıklamışlardır.Kesme hızının, alüminyum alaşımlarında işleme sonrasında meydana gelen mikro yapısal değişiklikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu iletmişlerdir. Takım geometrisindeki boşluk açısının, takım ile alüminyum iş parçası arasındaki sürtünmeyi önlerken kesici kenardaki zayıflığı önleyecek kadar küçük olması gerektiğini bildirmişlerdir. Kesme parametreleri, kesme sıvısı kullanımı, geometri, kaplama ve kesici takım malzemesi gibi çeşitli faktörler karmaşık talaş olgusunu etkilemiştir. Bu faktörleri ayarlayarak, yüzey bütünlüğünü ve takım ömrünü iyileştirmek için talaş oluşumu kontrol edilebileceğini tespit etmişlerdir[8].Prabakaran,AL5083 işlemiş ve farklı işleme proseslerinde sonuçlarını değerlendirmiştir. Yaptığı çalışmalar neticesinde yüzey pürüzlülüğünün yüksek hızlarda düşük, düşük ilerleme hızlarında ise yüksek olduğunu bulmuştur[9]. Yazıd ve arkadaşları, işleme parametrelerinin, özellikle kesme hızı, ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin, kuru ortamda boğa uçlu kesici ile yüksek hızlı frezeleme alüminyum alaşımı 7075-T6'da kesici takım ömrüne ve işlenmiş yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için yapılan deneysel çalışmanın bulgularını rapor etmektedir. 0,12 mm/diş ilerleme hızında 500 ve 600 m/dak hızlarda kesmenin ve 1,40 eksenel kesme derinliğinde kesmenin sırasıyla takım ömrünü uzattığı ve yüzey pürüzlülük değerini en aza indirdiği tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre kesme hızının en önemli faktör olduğu, bunu kesici takım ömrünü ve işlenmiş yüzey pürüzlülüğünü etkileyen ilerleme hızının takip ettiği bulunmuştur[10]. Zylka ve arkadaşları,7075

alüminyum alaşımının ince işleme frezelemesinde son teknoloji mikrogeometrinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi analiz etmişlerdir. Kesici kenarın yuvarlama yarıçapı ve kenar genişliği boyutunun seçilen değerlerinin kesme kuvveti parametreleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. En küçük kesme kenarı yuvarlama radyüslerinin kullanılması, en küçük kesme kuvvetlerine yol açmadığını tespit etmişlerdir[11].Çakır ve arkadaşları,AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımlarının tornalanmasında MQL(minimum yağlama) tekniği uygulanmıştır. Numuneler dört farklı kesme hızına (150, 187,5, 240 ve 300 m/dk), iki farklı ilerleme hızına (0,1 ve 0,2 mm/dev) ve dört farklı akış hızına (0,25, 0,45, 0,90 ve 3,25 ml/dk) tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda ilerleme ve kesme hızının artmasının yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediği, akış hızının artmasının ise yüzey kalitesini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir. Aynı şartlarda işlenen AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımlarının yüzey kalitesi karşılaştırıldığında,AA2024'ün yüzey kalitesinin AA7075'e göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durumun yüksek hızlarda daha belirgin hale geldiği iletilmiştir[12].Davoodi ve arkadaşları, kesme sıvısının uzaklaştırılması amacıyla kesme hızı ve deforme olmamış talaş kalınlığının kesme ve ilerleme kuvveti bileşenleri ile takım ucu sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmişlerdir. Yüksek Mg içeriğine (%4,5) sahip AA5083-O dövme alaşımı, kaplamalı karbür takım kullanılarak kuru ve ıslak işleme koşullarında işlemişlerdir. Kesme sıvısının çıkarılması, üretim maliyetlerinin ve sıvı üretim masraflarının azalmasına neden olduğunu iletmişlerdir. Bu da makineden ve parçalardan uzaklaştırılmasının maliyetini azaltmış ve bu sıvıların çevre ve insan sağlığı üzerindeki yıkıcı etkisini ortadan kaldırmıştır. Yüksek kesme hızları ve en az deforme olmamış talaş kalınlığı ile kuru işlemede, en az kesme ve ilerleme kuvvetlerine ve en düşük takım ucu sıcaklıklarına ulaşmamanın mümkün olduğunu iletmişlerdir. En yüksek kesme hızı ve en düşük deforme olmamış talaş kalınlığına sahip ıslak işlemede, en az kesme ve ilerleme kuvvetleri ile en düşük takım ucu sıcaklıklarını elde etmenin mümkün olduğu bildirilmişlerdir. Genel olarak, hem kuru hem de ıslak işlemede, deforme olmamış talaş kalınlığının artmasıyla birlikte kesme ve ilerleme kuvvetleri ve takım ucu sıcaklıkları önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir[13].Mahesh ve arkadaşları, Al 7075 T6 havacılık alüminyum alaşımının CNC parmak frezelemesinde eş zamanlı olarak yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek ve malzeme kaldırma oranını maksimuma çıkarmak için Taguchi yöntemiyle entegre bulanık mantığın uygulamasını açıklamaktadır. Dikkate alınan giriş parametreleri hız, ilerleme, kesme derinliği ve köşe radyusu olarak belirlenmiştir. Bu makale, çoklu performans özelliklerine sahip Al 7075 T6 Alüminyum alaşımının CNC parmak frezeleme proses parametrelerinin optimizasyonu için entegre Taguchi-Fuzzy'yi sunmaktadır. Yanıtları etkileyen en önemli parametreler köşe radyüsü ve kesme derinliği olarak belirlenmiştir[14]. Sekmen ve arkadaşları, AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının işlenmesinde, kesme parametrelerinin (takım talaş açısı ve kesme hızı) yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmişlerdir. Her iki alaşımın işlenmesi sonucunda, talaş açısının artmasıyla Ra değerleri azalırken, kesme hızının artmasıyla Ra değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. AA 2011 ve AA 7075 alaşımlarında 15º ve 20º'lik talaş açılarında yüzey pürüzlülük değerleri en düşük seviyede bulunmuştur. SEM fotoğrafları ile takım talaş açısının artmasıyla YK (Yığıntı katmanı) ve YT (Yığıntı Talaş) oluşumunun azaldığı kanıtlanmıştır. Burada, alüminyum alaşımlarının işlenmesinde yüksek talaş açılı (15º ve 20º) kesici takımların kullanılması önerilmektedir. AA 2011 alaşımında kesme hızının artmasıyla Ra değerlerinde ve yapışma eğiliminde belirgin bir değişiklik gözlenmezken, AA 7075 alaşımında kesme hızının artmasıyla YT ve YK oluşma eğilimi azalmıştır[15].

Yapılan literatür araştırmalarında alüminyum işleme problemleri incelenmiştir. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun kesme parametrelerinin etkisi ile ilgili olduğu görülmüştür. Takım geometrisinin etkisi ile ilgili çalışmaların azınlıkta olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmada parmak frezelerde uç yuvarlatmasının ve kesme parametrelerinin çevresel frezelemede kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2.MATERYAL METOT

2.1 Deney Numunesi

Çevresel frezeleme işlemlerinde AA 7075 T6 alaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan AA 7075 T6 alaşımının kimyasal bileşim Tablo 1'de mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan AA 7075 T6 alaşımının kimyasal bileşimi (% Ağırlıkça)

	Elementler(%)								
	Fe	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ti**	**Cu**	**Mg**	**Zn**	**Al**
Değerler	0,27	0,09	0,13	0,2	0,041	1,57	2,39	5,9	Kalan

Tablo 2. AA 7075 T6 alaşımının mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler			
1 Mpa = 1 N/mm^2 = 0.145 ksi = 102 kgf/mm^2			
	Çekme Dayanımı (Mpa)	**Akma Dayanımı (Mpa)**	**Uzama (%)**
Değerler	579	511	8,1

2.2 Kesici Takım

Deneylerde 12 mm çapında iki farklı parmak freze kullanılmıştır. Takımlardan birisi düz kenara sahipken diğer takım 0,2 mm uç yuvarlatmasına sahiptir. Düz parmak freze AFS ile uç yuvarlatmasına sahip takım ise 50F61 ile kodlandırılmıştır.

2.3 Kesme Parametreleri

Çalışmada 3 farklı ilerleme miktarı (0,2 mm/dev,0,25 mm/dev,0,3 mm/dev), üç farklı kesme hızı (300,350 ve 400 m/dak) kullanılmıştır. Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney deseni Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Deney deseni

Takım	Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Yana Kayma Mesafesi (mm)	Derinlik (mm)
50F61	1	300	0,2	2	18
50F61	2		0,25		
50F61	3		0,3		
50F61	4	350	0,2		
50F61	5		0,25		
50F61	6		0,3		
50F61	7	400	0,2		
50F61	8		0,25		
50F61	9		0,3		
AFS	10	300	0,2		
AFS	11		0,25		
AFS	12		0,3		
AFS	13	350	0,2		
AFS	14		0,25		
AFS	15		0,3		
AFS	16	400	0,2		
AFS	17		0,25		
AFS	18		0,3		

2.4 Takım Tezgahı

Çevresel frezeleme deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan, CNC 5 eksen işleme merkezinde (Hass VF 2 SS) gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için Kistler 9272 dinamometre ve Kistler 5070 amplifier kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 1'de verilmiştir.

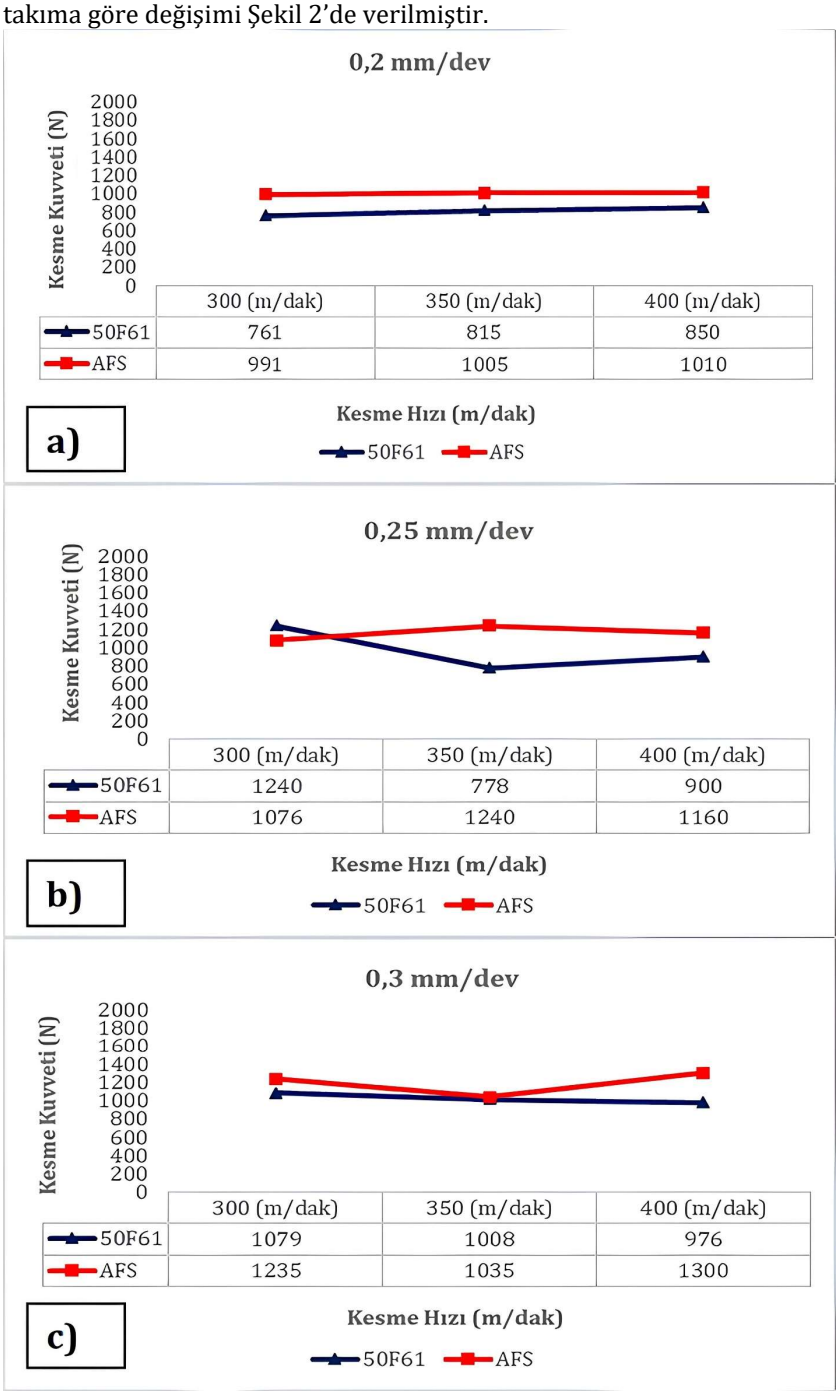


Şekil 1. Deney düzeneği

3.DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

Al 7075 alaşımının çevresel frezelemesinden meydana gelen kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve kesici takıma göre değişimi Şekil 2'de verilmiştir.



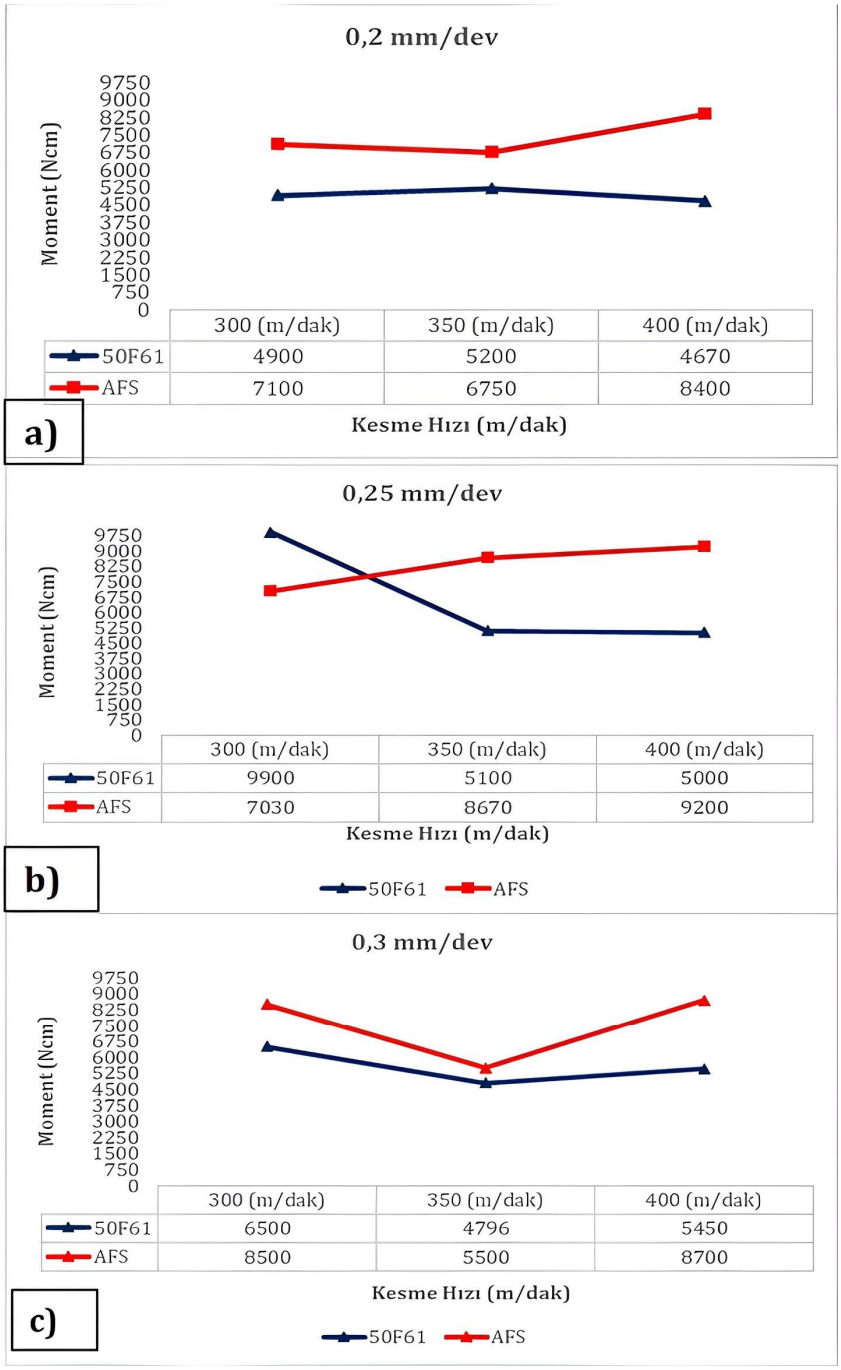
Şekil2. Kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve kesici takıma göre değişimi
a) 0,2 mm/dev b) 0,25 mm/dev c) 0,3 mm/dev

Şekil 2'de verilen grafik incelendiğinde genel olarak artan kesme hızlarının özelikle köşe yuvarlatmasına sahip takımlarda kesme kuvvetlerini düşürdüğü görülmüştür. Artan kesme hızları ile birlikte takım talaş ara yüzeyinin azalması ve kesme hızlarının artışı ile artan kesme bölgesi sıcaklıklarının artmasına bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir[16, 17] . Artan kesme hızları ile birinci ve ikinci deformasyon bölgesinde kesme bölgesi sıcaklıkları artmıştır. Bunun sonucu olarak malzemenin kayma gerilmesi azalmıştır [18-20]. Ayrıca artan kesme hızları ile birlikte yığıntı talaş oluşumu kararsız hale geldiği için yığıntı talaşın kesici takımdan daha sık bir periyotta ayrılır [21]. Bu bahsedilen durumlar genel olarak köşe yuvarlatmasına sahip takımlar için geçerli olsa da keskin kenarlı takımda durum biraz farklılık

göstermektedir. Özellikle artan kesme hızları ile birlikte keskin kenarlı kesici takımlarda elde edilen kesme kuvvetlerinde bir artış olduğu görülmektedir. Her ne kadar kesme hızı artışı kesme bölgesi sıcaklığını arttırıp daha rahat bir kesme yapmaya sebep olsa da aynı zamanda takım aşınmasını da olumsuz yönde etkilemektedir [22]. Artan kesme hızları ile birlikte özellikle keskin köşeli takımların aşınmadan daha fazla etkilendiği ve ayrıca köşe yuvarlatmanın aşınma açısında daha olumlu sonuç verdiği düşünülmektedir. Yine grafikte artan ilerleme miktarı ile birlikte her iki kesici takımda da kesme kuvvetlerinin genel olarak arttığı görülmüştür. Artan ilerleme ile birlikte artan talaş hacminin kesme kuvvetlerini arttırdığı düşünülmektedir.

3.2. Momentin Değerlendirilmesi

Kesme hızı ve kesici takıma göre moment değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'te verilen grafik incelendiğinde kesme kuvvetlerine benzer bir durumun söz konusu olduğu söylenebilir.



Şekil3. Momentin kesme hızı ve kesici takıma göre değişimi
b) 0,2 mm/dev b) 0,25 mm/dev c) 0,3 mm/dev

Genel olarak artan kesme hızları özellikle köşe yuvarlatmasına sahip takımlarda moment değerlerini düşürmüştür. Fakat keskin köşeli takımda tüm ilerleme miktarlarında 450 m/dak kesme hızında moment değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Bu durum kesme kuvvetlerinde olduğu gibi takım aşınmasına atfedilmiştir Artan ilerleme miktarı ile birlikte keskin kenarlı kesici takımlarda moment değerlerini arttığı görülmektedir. İlerleme miktarı ile birlikte moment değerlerini artması literatürde karşılaşılan bir durumdur [23]. İlerleme miktarı ile birlikte talaş hacminin artmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir [24]

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Al 7075 alaşımının keskin köşeli ve uç köşe yuvarlatmasına sahip takımlar ile çevresel frezelemesinde meydana gelen kesme kuvvetleri ve moment değerleri incelenmiştir. Deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- En küçük kesme kuvveti 761 N değeri ile köşe yuvarlatmasına sahip takımda takımında meydana gelmiştir. En yüksek kesme kuvveti ise 1300 N değeri olarak keskin köşeli takımda ölçülmüştür.
- En küçük moment değeri 4670 Ncm ile köşe yuvarlatmasına sahip takımlarda 400 m/dak kesme hızı ve 0,2 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir.
- Genel olarak özelikle köşe yuvarlatmasına sahip takımlarda artan kesme hızlarının kesme kuvvetlerini düşüş meydana gelmesine sebep olduğu görülmüştür.
- Gerek kuvvet gerekse moment değerlinde köşe yuvarlatmasına sahip takımların daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

[1] G.Eroğlu, M.Şahiner, ,"Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum",Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite raporu,1-23, 2018.

[2] Ü.Karabuğa, "Alüminyum 7075-T6 Malzemenin Isı Desteği İle İşlenmesi ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,2022.

[3] A.H. Demirci, Mühendislik malzemeleri :önemli endüstriyel malzemeler ve ısıl işlemleri, Aktüel, 2004.

[4] M.C. Santos Jr, A.R. Machado, W.F. Sales, M.A.S. Barrozo, E.O. Ezugwu," Machining of aluminum alloys: a review", Springer-Verlag London, 1-15,2016.

[5] Y. Seymen, "Alüminyumun (AL7075) Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplanmış Parmak Freze İle İşlenmesinin Deneysel İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı,2009.

[6] D.Devsingh," Experimental Investigation to Predict Characteristics of Tool and Aluminum Alloy Workpiece in Face Milling",ResearchGate,1-8,2018

[7] N.T Nguyen, D.H.Tien, N.T. Tung, N.D. Luan, "Analysis Of Tool Wear And Surface Roughness İn High-Speed Milling Process Of Aluminum Alloy Al6061", ResearchGate,1-15,2021

[8] D.Y.Pimenov, M.Kiran, N.Khanna, G. Pintaude, M.C. Vasco, L.R.R Silva,K. Giasin," Review Of İmprovement Of Machinability And Surface İntegrity İn Machining On Aluminum Alloys", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology",1-38,2023

[9] M. P. Prabakaran, G. R. Kannan, K. Thirupathi, A. Hari Prakash," Optimization Turning Process Parameters of Aluminum Alloy 5083 using Response Surface Methodology", ResearchGate,1-5,2014

[10] M. Z. A. Yazıd, A. Zainol," Tool Life And Surface Roughness In Dry Hıgh Speed Milling Of Aluminum Alloy 7075-T6 Using Bull Nose Carbıde İnsert", Journal of Engineering Science and Technology,1-11,2020

[11] L.Zylka, R. Flejszar, P. Lajmert," Influence of Cutting-Edge Microgeometry on Cutting Forces in High-Speed Milling of 7075 Aluminum Alloy", Materials,1-17,2023

[12] A. Çakır, S. Yağmur2, N. Kavak3, G. Küçüktürk, U. Şeker, "The Effect Of Minimum Quantity Lubrication Under Different Parameters İn The Turning Of Aa7075 And Aa2024 Aluminium Alloys", Springer-Verlag,1-7,2015

[13] B. Davoodi, A.H.Tazehkandi, "Experimental Investigation And Optimization Of Cutting Parameters İn Dry And Wet Machining Of Aluminum Alloy 5083 İn Order To Remove Cutting Fluid", Journal of Cleaner Production,1-9,2014

[14] T.P.Mahesh, R.Rajesh, "Optimal Selection of Process Parameters in CNC End Milling of AL 7075-T6 Aluminium Alloy using a Taguchi-Fuzzy Approach", Procedia Material Science,1-10,2014

[15] M.Sekmen, M.Günay, U.Şeker, " Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi", Politeknik Dergisi,1-8,2014

[16] Trent EM. Metal Cutting. 3rd ed. London: Butterworths Press; 1989.

[17] Halil Demir, Süleyman Gündüz, "The Effects Of Aging On Machinability Of 6061 Aluminium Alloy", Materials & Design, Volume 30, Issue 5, 2009, Pages 1480-1483,https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.007.

[18] Ergün Ekici," Alüminyum Matrisli B4c Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi", Doktora Tezi 2012, Gazi Üni. FBE

[19] Çifçi, İ., "Machining Of Austenitic Stainless Steels Using CVD Multi-Layer Coated Cemented Carbide Tools", Tribology International, 39: 565-569 (2006).

[20] Lima, J.G., Avila, R.F., Abroa, A.M., Faustino, M., Paulo, Davim, J.," Hard Turning AISI 4340 High Strsngth Low Steel And AISI D 2 Cold Work Steel", Journal of Materials Processing Techonology, 169: 388-395, (2005).

[21] İ. Çiftçi, "AISI 304 Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Kaplanmiş Sementit Karbür Kesici Takımla İşlenmesi Esnasında Oluşan Takım Aşınması," Teknoloji, Cilt 7, Sayı 3, 489-495, (2004)

[22] Kaya, E., Kaya, İ. (2023)." Şekil Hafızalı Alaşımların Farklı Kesici Takım Malzemeleri Kullanarak]Alın Frezeleme ile İşlenmesinde Kesme Hızlarının Takım Aşınması Oluşumu ve İlerlemesine Etkisinin İncelenmesi". Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(1), 76-83. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1134161

[23] Akdulum A., Kayır Y., "Investigation Of The Effect Of U Drills With Different Properties On Thrust Force, Torque And Spindle Load", Politeknik Dergisi, 26(1): 387400, (2023

[24] F. Memiş, Y. Turgut, "AISI 2205 Dubleks Paslanmaz Çeliğin CNC Torna Tezgâhında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Araştırılması", İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları, 1 (1): 22-33, 2020.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Camilerde Rüzgar Kulesi İle Doğal Havalandırmanın Sayısal Analizi

Emre DEMİRBİLEK[a], Abuzer Kadir ÖZSUNAR[b]*

[b]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
[b]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: edemirbilek@ilbank.gov.tr

ÖZET

Yapılan bu çalışmada; Ortadoğu ve İran'da yaygın olarak kullanılan rüzgar kulesi (Badgir) örnek alınmıştır. Cami minaresinin rüzgar kulesi olarak tasarlanmasıyla camilerde doğal havalandırma verimliliğinin artırılması ve termal konforun iyileştirilmesi amaçlandı. Kubbenin kenarlarında ve üst kısmında çeşitli sayı ve büyüklükte açıklıklar bırakılarak havalandırmaya etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca bu açıkların, açık veya kapalı olduğu senaryolar da modellenmiştir. Farklı rüzgar hava hızları ve sıcaklıkları incelenerek termal konfor düzeyleri araştırılmıştır. Farklı sayıda minareye (rüzgar kulesi) sahip cami modelleri modellenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Yaz ve kış senaryoları oluşturularak toplam 41 çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar Solidworks programında üç boyutlu olarak tasarlanmış, Ansys Fluent programında modellenip analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda referans olarak ayak, bel ve baş seviyesindeki termal konfor gözlenmiştir. Ashrae 55 Standardına uygun olarak yapılan hesaplamalarda PMV ve PPD değerleri belirlenerek hangi senaryoların ısıl konfor ve doğal havalandırmaya katkı sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre minarenin rüzgar kulesi olarak kullanılması; doğal havalandırmaya önemli katkılar sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle havalandırma amaçlı pencerelerin uzun süre açılamadığı kış aylarında bu sistemin termal konforda önemli bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Yaz aylarında ise bu sistemin tek başına yeterli olabileceği veya pencerelerle uyumlu olarak kullanıldığında doğal havalandırmayı iyileştirdiği ve ısıl konforu arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Doğal havalandırma, rüzgar kulesi, camiler, badgir*

Numerical Analysis Of Natural Ventilation With Wind Tower In Mosques

Emre DEMİRBİLEK[a], Abuzer Kadir ÖZSUNAR[b]*

[b]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
[b]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: edemirbilek@ilbank.gov.tr

ABSTRACT

In this study; The wind tower (Badgir), which is widely used in the Middle East and Iran, was taken as an example. By designing the mosque minaret as a wind tower, it was aimed to improve natural ventilation and thermal comfort in mosques. Openings of varying numbers and sizes were left on the edges and top of the dome. Scenarios in which these openings are open or closed are also modeled. Thermal comfort levels were investigated by examining different air speeds and temperatures. Mosque models with different numbers of minarets were modeled and compared. A total of 41 studies were carried out by creating summer and winter scenarios. The studies were designed in three dimensions in Solidworks program, modeled and analyzed in Ansys Fluent program. In the studies conducted, thermal comfort at the foot, waist and head levels was observed as a reference. PMV and PPD values were determined in accordance with the Ashrae 55 Standard and it was determined which scenarios contributed to thermal comfort and natural ventilation. According to the results obtained, the use of the minaret as a wind tower; It has been determined that it makes significant contributions to natural ventilation and increases thermal comfort.

Keywords: *Natural ventilation, wind tower, mosques, badgir*

I. GİRİŞ

Dünya genelinde, özellikle de son yıllarda enerji tasarrufu tüm dünya adına önemli bir olmuştur. Endüstriyel faaliyetlerin ve nüfusun artmasına paralel olarak enerji talebi de hızla artmaktadır. Enerji tasarrufu, doğal kaynakları daha sürdürülebilir bir şekilde kullanarak çevresel etkileri azaltmaya ve gelecek nesillere temiz bir çevre bırakmaya yardımcı olur.

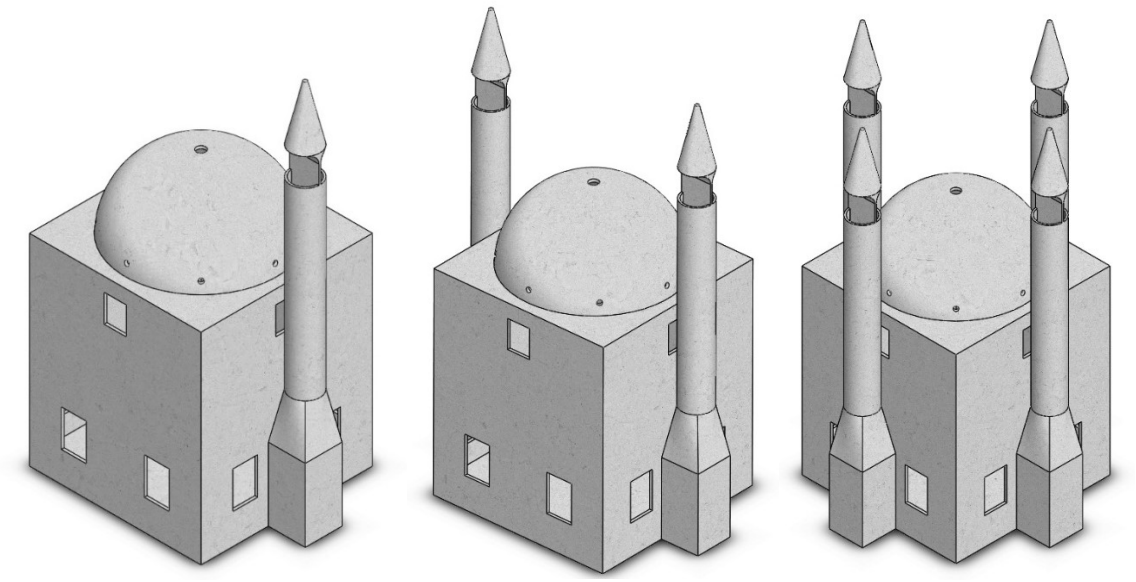
İşte tam da bu noktada enerji gider kalemlerinde; iklimlendirme ve havalandırma sistemleri önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde, özellikle mimari tasarımdan kaynaklı olarak çoğu binada mekanik havalandırma yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu da yukarıda belirtilen enerji giderlerini artıran önemli bir başlık olmuştur. Binaların havalandırmasında, daha proje aşamasındayken mümkün olduğunca mekanik sistemler yerine doğal havalandırma senaryoları çalışılmalı ve tasarlanmalıdır. Çünkü; iyi planlanmış bir doğal havalandırma sistemi, iç mekanlarda sağlıklı bir ortam oluşturmanın yanı sıra enerji maliyetlerini de azaltacağı görülmüştür.

Doğal havalandırma, iç mekanlarda sirkülasyonu artırarak mekanın daha rahat ve konforlu olmasına yardımcı olmaktadır. Yeterli hava sirkülasyonu, sıcaklık ve nem kontrolüne katkıda bulunmaktadır. Ayrıca; binaların içinde oluşabilecek nem ve küf oluşumunu önlemektedir. Enerji tasarrufu ve doğal havalandırmanın bir arada çok önemli olduğu en önemli yapılardan biri ibadethanelerdir. Özellikle ülkemizde ve dünyamızda bulunan çok sayıda camide, ibadet süresince yeterli oksijen miktarı, uygun nem ve sıcaklık gibi parametrelerin nominal değerlerde olmasını sağlamak adına ve mekanik sistemlerden uzak durarak camilerde enerji giderlerini düşürme noktasında, doğal havalandırma çok önemli bir başlık olarak önümüze gelmektedir.

Bu çalışmada da camilerin doğal havalandırılmaları üzerine alternatif bir model oluşturulmuştur. Ortadoğu ve İran coğrafyasında doğal havalandırma ve iklimlendirmede yaygın şekilde kullanılan rüzgar kulesi (Badgir) baz alınarak camilere uygun hale getirildiği bir tasarım yapıldı. Bu çalışma ile camilerde çok kritik bir ihtiyaç olan havalandırma sisteminin daha az ilk yatırım maliyeti, daha az enerji ve işletme gideri hedeflenirken daha fazla termal konfor ve daha kaliteli doğal bir hava akışı sağlayacak alternatif ve yenilikçi bir yaklaşımla inovatif bir bakış açısı getirmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile yeni yapılacak cami projelerine bu sistem uygulanarak doğal havalandırmanın yaygınlaştırılması, mekanik havalandırma sistemlerine nazaran elde edilecek enerji tasarrufu ile ülke ekonomisine katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

II. MATERYAL METOT

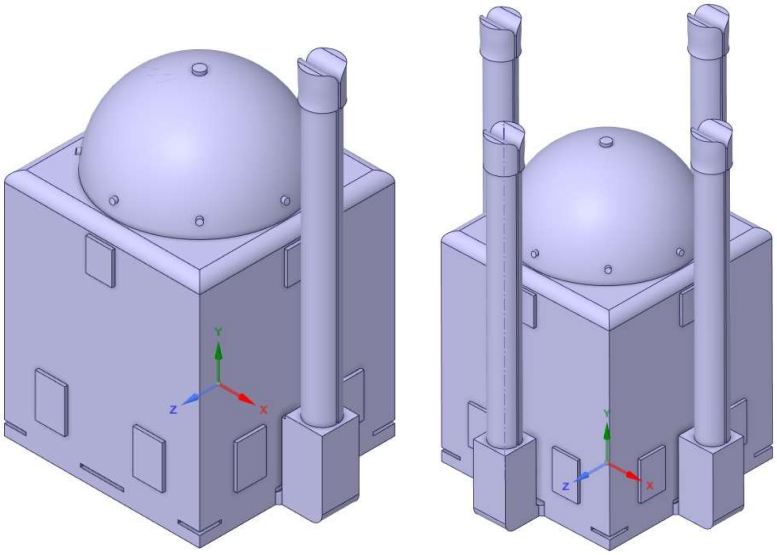
Bu çalışmada analizleri yapılan tüm cami modelleri katı modelleme programı aracılığıyla üç boyutlu olarak tasarlanmışlardır. Oluşturulan senaryolara uygun çok sayıda model tasarlanmıştır. Aşağıdaki görselde farklı sayılardaki minareye sahip cami modellerinin örnekleridir.



Şekil 1. Farklı minare sayılarına sahip üç boyutlu modellenmiş cami örnekleri

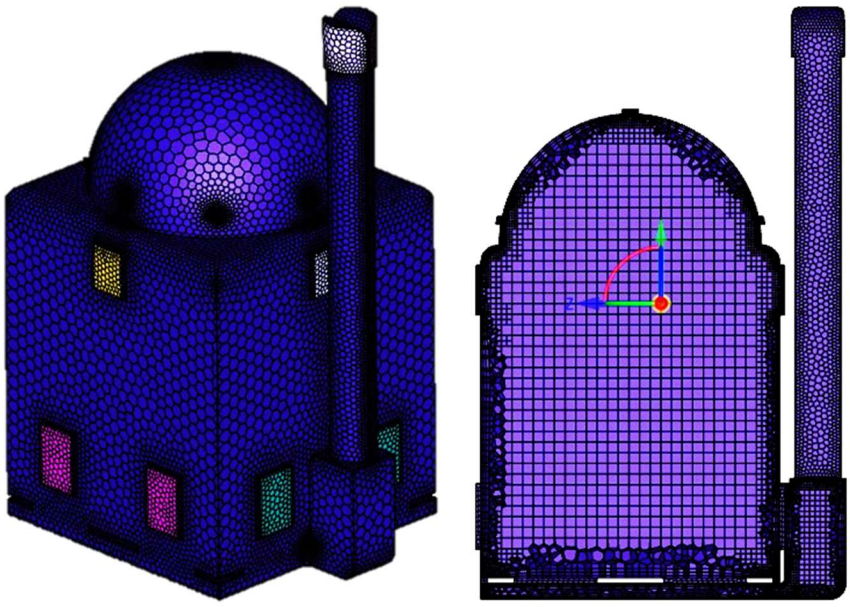
Cami 9m x 9m taban ölçüleri ve kubbe dahil olmak üzere yaklaşık 15m yüksekliğe sahiptir. Minare yüksekliği 21m olarak tasarlanmıştır. Minarede rüzgar kulesi olarak kullanılan kanal 16,5m -18m aralığında konumlandırılmış olup, 1,5m'lik yüksekliğe sahiptir. Minare dış çapı 1,6m olup, iç çapı 1,4m olarak modellenmiştir. Cami alt pencere boyutları 1,35m x 2m olup, üst pencereler 1,2m x 1.5m olarak seçilmiştir. Minareden rüzgar kulesi aracılığıyla içeriye alınan havanın, ibadet eden insanlara doğrudan temas edip termal konforsuzluk yaratmamasına adına; duvar kenarlarında bırakılan 8 adet havalandırma boşluklarından dağıtımı planlanmıştır. Bu havalandırma boşluklarının ölçüleri 0,2m x 2,5m olarak seçilmiştir.

Çalışmanın devamında; üç boyutlu cami modellerinde tamamlandıktan sonra Ansys SpaceClaim programı aracılığıyla her bir çalışmanın akış hacimleri oluşturulmuştur. Her bir model için ayrı ayrı akış hacimleri oluşturularak bir sonraki aşama olan mesh işlemine geçilmiştir.



Şekil 2. Akış hacimleri oluşturulmuş farklı minare sayılarına sahip cami örnekleri

Mesh çalışmaları "Ansys Fluent Meshing" ile gerçekleştirilmiştir. Mesh işlemi yapılırken tüm modeller için mesh kalitesini gösteren "orthogonal quality ve "skewness" değerleri baz alınarak, her ikisi için de "çok iyi" olacak şekilde mesh işlemi yapılmıştır Mesh işleminde "poly-hexcore" kullanılmıştır.



Şekil 3. Mesh işlemi tamamlanmış tek minareli cami modelinin izometrik ve kesit görünümü

Bu çalışmada da doğal konveksiyon senaryosu için iyi performans ortaya koyan SST k- ω modeli seçilerek çözümlerde kullanılmıştır.

A. Korunum Denklemleri

Isı transferinde ve akışkanlar mekaniğinde, akışkanın davranış biçimi matematiksel olarak belirten korunum denklemlerinin asıl temeli aşağıdaki üç yasaya dayanır:

- Akışkan içerisinde çok küçük boyutlarda kontrol hacmi üzerinden geçen toplam kütle akısı, bahsedilen hacim içindeki kütlenin zamana göre gösterdiği değişimine eşittir. Bu da kütlenin korunumu yasasıdır.
- Benzer şekilde aynı hacim elemanı üzerinden geçen toplam momentum akısı, bahsedilen hacim içerisindeki momentumun zaman içerisindeki değişimine eşittir. Bu, momentumun korunumu yasası olarak bilinmektedir.
- Hacim elemanı üzerindeki toplam enerjisindeki oluşan fark, ısı transferi değerindeki ve hacim elemanı üzerinde gerçekleşen işteki farkın toplamına eşittir. Bu, enerjinin korunumu yasası olarak bilinmektedir.

Buna bağlı olarak korunum denklemleri şu şekilde elde edilir [1]:

Süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

x, y, z yönündeki momentum denklemleri sırasıyla şu şekilde ifade edilir:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+v(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \tag{2}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)-g \tag{3}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+v\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{4}$$

Enerji denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{5}$$

B. Doğal Taşınım Çözümü

Doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Doğal taşınım yoğunluk farkından kaynaklanan akışkanın yerçekimi etkisiyle hareket etmesi sonucu gerçekleşir ve bu yoğunluk farkı sıcaklık değişiminden kaynaklanır. Doğal taşınımdan dolayı gerçekleşen sınır tabaka içindeki herhangi bir noktadaki y-basınç gradyanı, sınır tabaka dışındaki durgun bölge içindeki basınç gradyanına eşit olmalıdır. Ancak bu bölgede v = 0'dır, bu nedenle eşitlik şu şekilde olur [2]:

$$\frac{\partial p}{\partial y}=-\rho_{\circ}g \tag{6}$$

(6) eşitliği, (3) eşitliğinde olduğu yere konulursa, sınır tabakası içindeki doğal taşınım için her noktasında aşağıdaki bağıntı geçerli olur [43]:

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{g}{\rho}(\rho_{\circ}-\rho)+v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{7}$$

(7) eşitliğinin sağ tarafında kalan ilk ifade kaldırma kuvveti ifadesidir.

C. Boussinesq Modeli

(7) numaralı eşitlikte kaldırma kuvveti ifadesi sıcaklık değişimi ile yoğunluk değişimi arasında bir ilişki kurulabilirse eğer, yoğunluk sabit kabul edilerek doğal taşınım modellenebilir. İşte bu noktada Boussinesq modeli, bahse konu ilintiyi hacimsel ısıl genleşme ifadesinin (β) yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ifadesinden faydalanarak oluşturur [2]:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}(\frac{\partial p}{\partial T})_{\mathrm{p}} \tag{8}$$

Bu denklemde kısmi türev ifadesi referans bir yoğunluk ve sıcaklık noktasından hareketle fark ifadesine dönüştürülür:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\Delta p}{\Delta T}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\rho_\circ - \rho}{T_\circ - T} \tag{9}$$

Buradan 4.7 denkleminde bulunan yoğunluk değişimi sıcaklık değişimine dönüştürülmüş olur:

$$\rho_\circ - \rho \approx \rho\beta(T_\circ - T) \tag{10}$$

Boussinesq modeline göre düzenlenmiş (7) denklemi aşağıdaki denkleme dönüşür [2]:

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = g\beta(T - T_\circ) + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{11}$$

Yoğunluk sabit kabul edildiğinden Boussinesq modeli sayısal analizlerde daha hızlı bir şekilde yakınsama yapabilir. Havanın sıcaklığındaki ve değişimler az olduğu, başka bir deyişle β(T- 0)< 1 sürece Boussinesq modeli kullanılabilir. Bu modeli için sayısal analiz aşamasında bazı parametrelerin tanımlanması gerekir:

- T_0 çalışma sıcaklığı
- T_0 sıcaklığındaki sabit yoğunluk değeri, ρ_0
- Hacimsel ısıl genleşme katsayısı, β

İdeal gaz kabul edilerek ısıl genleşme katsayısı aşağıda bulunan denklem ile hesaplanabilir:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}} = \frac{1}{\rho}\frac{p}{RT^2} = \frac{1}{T} \tag{12}$$

D. PVM ve PPD

Dünyada herkes tarafından kullanılan PMV modeli, termal konfor için kullanılan düğer modeller arasında, her yapı tipine ve farklı iklim bölgelerinde kullanılabilen ve yaygın olarak tercih edilen bir modeldir [3]. PMV modeli, tüm vücut veya genel termal konfor analizinde öncelikli olarak kullanılan bir modeldir. Bu model, iklim çalışmaları ve laboratuvar araştırmaları yapılan 1960'lı yıllarda elde edilmiştir. PMV modeli, mekan içerisindeki insanlar için belirli bir optimum sıcaklık öngörmek adına kullanılan bir araçtır [4]:

$$\begin{aligned}\mathrm{PMV} = {} & [0{,}303\, e^{-0{,}036.M} + 0{,}028] \times \{(M-W) - 3{,}05 \times 10^{-3}\,[5733 - 6{,}99\,(M-W) - P_a] \\ & - 0{,}42\,[(M-W) - 58{,}15] - 1{,}7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - P_a) - 0{,}0014M \times (34 - t_a) \\ & - 3{,}96 \times 10^{-8} f_{cl}\,[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c\,(t_{cl} - t_a)\}\end{aligned} \tag{13}$$

$$t_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028.(M-W) - I_{cl}.\{3{,}96.10\text{-}8.f_{cl}.[(t_{cl}+273)4 - (t_r+273)4] + f_{cl}.h_c.(t_{cl} - t_a)\} \tag{14}$$

$$h_c = \begin{cases} 2{,}38.|t_{cl} - t_a|0{,}25 \text{ için } 2{,}38.|t_{cl} - t_a|0{,}25 > 12{,}1.\sqrt{V_{ar}} \\ 12{,}1.\sqrt{V_{ar}} \text{ için } 2{,}38.|t_{cl} - t_a|0{,}25 < 12{,}1.\sqrt{V_{ar}} \end{cases} \tag{15}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1{,}00 + 1{,}290\, I_{cl} \text{ için } I_{cl} \le 0{,}078 \text{ m2.K/W} \\ 1{,}05 + 0{,}645\, I_{cl} \text{ için } I_{cl} > 0{,}078 \text{ m2.K/W} \end{cases} \tag{16}$$

$$PPD=100-95 \times \exp(-0{,}03353.PMV^4-0{,}2179.PMV^2) \quad (17)$$

PMV=tahmini ortalama oy
PPD=memnuniyetsizlerin tahmini yüzdesi
P_a=kısmi su buhar basıncı (Pa)
t_{cl}=kıyafet yüzey sıcaklığı (°C)
h_c=konveksiyon ısı transferi katsayısı [W/(m^2.K)]
I_{cl}=kıyafet yalıtımı (m^2.K/W)
1 met= 58,2 W/m^2
M=metabolik oran (W/m^2)
W=etkin mekanik güç (W/m^2)
t_a=hava sıcaklığı (°C)
f_{cl}=kıyafet yüzey alan faktörü
V_{ar}=bağıl hava hızı(m/s)
t_r=ortalama ışınım sıcaklığı (°C)
1_{clo} = 0,155 m^2.°C /W

Çalışma kapsamında 19 adet Kış Senaryosu, 22 Adet Yaz Senaryosu olmak üzere toplamda 41 adet senaryo çalışılmıştır. Çalışmalarda; ibadet halinde olan insanların termal konforlarını tespit edebilmek adına Ayak, Bel ve Baş hizalarındaki ortalama sıcaklıklar ve ortalama hava hızı değerleri hesaplanmıştır. Bağıl Nem %50, Metabolizma Hızı 1.8, Kıyafet Seviyesi 1.0(Kış)-0,5(Yaz) olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda PMV ve PPD değerleri tespit edilmiştir. PMV ve PPD sonuçlarına göre ortamdaki termal konfor hissiyatları belirlenmiştir.

Tablo 1.'de KS1-KS2-KS3 model çalışmalarına ait giriş parametreleri ve sınır değerleri verilmiştir. 41 Adet çalışma için bu tablolar oluşturularak çalışmalar tamamlanmıştır.

Tablo 1. KS1-KS2-KS3 model çalışmalarına ait giriş parametreleri ve sınır değerleri

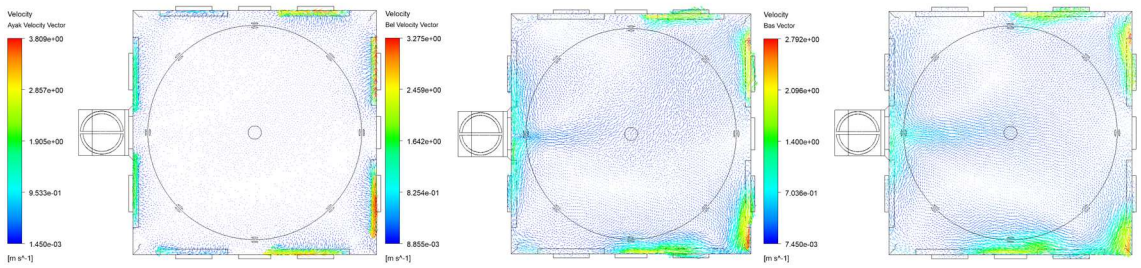
MODEL	PENCERE AÇIKLIK DURUMU	KUBBE KENAR DELİK SAYISI	KUBBE KENAR DELİK AÇIKLIK DURUMU	KUBBE KENAR DELİK ÇAPI	KUBBE TEPE DELİK AÇIKLIK DURUMU	KUBBE TEPE DELİK ÇAPI	MİNARE ÇIKIŞ	HAVA ISITICI DERECESİ	GİRİŞ HAVA HIZI	MİNARE SAYISI	GİRİŞ HAVA SICAKLIĞI	İNSAN VARLIĞI
KS1	KAPALI	8	AÇIK	0.25 m	AÇIK	0.5 m	AÇIK	60 °C	3 m/s	1	10 °C	YOK
KS2	KAPALI	4	AÇIK	0.25 m	AÇIK	0.5 m	AÇIK	60 °C	3 m/s	1	10 °C	YOK
KS3	KAPALI	12	AÇIK	0.25 m	AÇIK	0.5 m	AÇIK	60 °C	3 m/s	1	10 °C	YOK

Tablo 2.'de KS1-KS2-KS3 model çalışmaları için elde edilmiş Ayak, Bel ve Baş hizasındaki ortalama sıcaklık ve ortalama hava hızları, PMV ve PPD değerleri ve termal hissiyat durumu örnek verilmiştir. 41 Adet çalışma için bu tablolar oluşturularak hesaplamaları tamamlanmıştır.

Tablo 2. KS1-KS2-KS3 model çalışmalarının analizleri sonucu elde edilen veriler

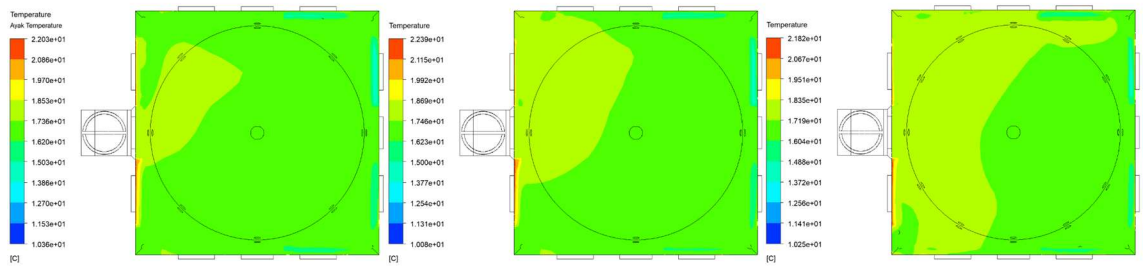
ÇALIŞMA NO	AYAK ORT. SICAKLIK (°C)	AYAK ORT. HIZ (M/S)	BAĞIL NEM	METABOLİZMA HIZI	KIYAFET SEVİYESİ	PMV (AYAK)	PPD AYAK (%)	HİSSİYAT
KS1	16,88	0,28	%50	1,8	1,0	-0,82	19	Biraz Serin
KS2	17,08	0,23	%50	1,8	1,0	-0,74	17	Biraz Serin
KS3	17,17	0,30	%50	1,8	1,0	-0,79	18	Biraz Serin
ÇALIŞMA NO	BEL ORT. SICAKLIK (°C)	BEL ORT. HIZ (M/S)	BAĞIL NEM	METABOLİZMA HIZI	KIYAFET SEVİYESİ	PMV (BEL)	PPD BEL (%)	HİSSİYAT
KS1	16,91	0,28	%50	1,8	1,0	-0,81	19	Biraz Serin
KS2	17,08	0,23	%50	1,8	1,0	-0,77	17	Biraz Serin
KS3	17,16	0,29	%50	1,8	1,0	-0,78	18	Biraz Serin
ÇALIŞMA NO	BAŞ ORT. SICAKLIK (°C)	BAŞ ORT. HIZ (M/S)	BAĞIL NEM	METABOLİZMA HIZI	KIYAFET SEVİYESİ	PMV (BAŞ)	PPD BAŞ (%)	HİSSİYAT
KS1	16,93	0,30	%50	1,8	1,0	-0,82	19	Biraz Serin
KS2	17,10	0,24	%50	1,8	1,0	-0,75	17	Biraz Serin
KS3	17,14	0,31	%50	1,8	1,0	-0,80	18	Biraz Serin

Şekil 4.'te KS1-KS2-KS3 model çalışmalarının Ayak, Bel ve Baş hizasındaki hız dağılımları gösterilmektedir. 41 Adet çalışma için bu hız dağılımları oluşturularak kıyaslamalar yapılmıştır.



Şekil 4. KS1-KS2-KS3 model çalışmalarına ait Ayak, Bel ve Baş hizası hava hızı dağılımları

Şekil 5.'te KS1-KS2-KS3 model çalışmalarının Ayak, Bel ve Baş hizasındaki sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. 41 Adet çalışma için bu sıcaklık dağılımları oluşturularak kıyaslamalar yapılmıştır.



Şekil 5. KS1-KS2-KS3 model çalışmalarına ait Ayak, Bel ve Baş hizası hava sıcaklığı dağılımları

III. SONUÇLAR

Çalışmalar şunu göstermiştir ki; cami minarelerinin rüzgar kulesi (badgir) olarak kullanılması hem yaz aylarında hem de kış aylarından doğal havalandırma için verimli olduğunu göstermektedir. Özellikle kış aylarında, termal konforu düşürdüğü için pencerelerin ibadet sırasında sürekli açık kalamadığı düşünüldüğünde bu sistemin kış ayları için çok önemli avantajlar sunduğu ortaya konulmuştur. Yaz aylarında ise bu sistemin, pencerelerle birlikte veya tek başına termal konfora katkı sağladığı görülmüştür. Yapılan tasarımlarda dışarıdan gelen havaya ön ısıtma veya soğutma yaparak ortamın havalandırılması sağlanırken hem de caminin ihtiyacı olan ısıtma ve soğutma ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu çalışma ile ekstra bir ısıtma ve soğutma sistemine gerek olmadan ortamın iklimlendirilmesi yapılabilmektedir. Toz ve alerjen maddelerin ortamda yaygın olarak bulunabileceği camilerde, hava sirkülasyonunun iyileştirilmesi çok önemlidir. Kubbe kenarlarında ve tepesinde bırakılan havalandırma deliklerinin doğal havalandırmaya çok ciddi katkı sunduğu, hava sirkülasyonunu iyileştirdiği görülmüştür.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışma ile camilerde çok kritik bir ihtiyaç olan havalandırma sisteminin daha az ilk yatırım maliyeti, daha az enerji ve işletme gideri hedeflenirken daha fazla termal konfor ve daha kaliteli doğal bir hava akışı sağlayacak alternatif ve yenilikçi bir yaklaşımla inovatif bir bakış açısı getirmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile yeni yapılacak cami projelerine, bu sistem uygulanarak doğal havalandırmanın yaygınlaştırılması, mekanik havalandırma sistemlerine nazaran elde edilecek enerji tasarrufu ile ülke ekonomisine katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

V. ÇIKARIM

Minarelerin rüzgar kulesi olarak modellenmesi, doğal havalandırma ve termal konfor şartları üzerine etkilerinin incelemesi sonucunda, bu sistemin geleneksel pencere ile havalandırmaya göre çok ciddi avantajlar sunduğu, pencerelerle birlikte de kombinlenerek verimli şekilde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlamamda her türlü desteği sağlayan, yol gösteren, çok kıymetli ve değerli hocam Prof. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR'a, çok değerli eşim Aylin NAYMAN DEMİRBİLEK'e, canım oğlum Ege DEMİRBİLEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

[1] White, F. M. (2003). Fluid Mechanics. McGraw-Hill, New York.
[2] Incropera, F. P. ve Dewitt, P. D. (2002). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, New York.
[3] Parsons, K. C. (1994). Thermal Comfort Standards: Past, Present And Future And Open Discussion That Follows In: Oseland, N.A. and Humphreys, M.A. (eds.), Thermal Comfort: Past, Present and Future, BRE, Geneva, 184–197.
[4] McIntyre, D.A. (1973). A Guide To Thermal Comfort, Applied Ergonomics, 4 (2), 66- 72.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Kabin Tipi Tam Otomasyon Boya Temizleme Makinesi Tasarımı ve Üretimi

Mustafa Korkmaz[a], Mehmet Budakçı[a], İzham Kılınç[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Tasarım Bölümü, İç Mekan Tasarımı Programı, Batman/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** mustafakorkmaz@duzce.edu.tr

ÖZET

Koruyucu özelliğini yitirmiş boya ve vernik katmanlarının ahşap yüzeylerden etkili bir şekilde yüzeye zarar vermeden temizlenmesi hem estetik hem de malzemenin uzun ömürlü kullanımı açısından önemlidir. Sıklıkla kullanılan kazıma veya zımparalama yöntemleri yüksek iş gücü ve işlem zamanı gerektirmektedir. Boya sökücü kimyasallar gibi diğer alternatifler ise insan ve çevre sağlığını ciddi şekilde tehdit etmektedir. Bu sorunları aşmak için, bu çalışma kapsamında yeni bir çözüm sunan Kabin Tipi Tam Otomasyon Boya Temizleme makinesi (KATTABOT) Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TUBITAK) 2210709 numaralı proje desteği ile tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. KATTABOT, basınçlı hava ile çeşitli medyaları yüzeye püskürterek, ahşap yüzeylerin yanı sıra farklı malzemelerin boya ve vernik katmanlarını temizleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Benzerlerinden farklı olarak temizleme basıncı, nozul çapı, temizleme açısı, temizleme mesafesi ve temizleme hızı gibi parametreleri kontrol etme ve değiştirme olanağı sağlayan makine, farklı yüzey temizliği senaryoları için esnek bir kullanım sunmaktadır. Ayrıca, temizleme işleminde kullanılabilecek medyaların çeşitleri bakımından hem farklı endüstrilere hem de bu alandaki araştırmalara katkı sağlayarak, çevre dostu bir boya temizleme çözümü sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Ahşap malzeme, Boya temizleme, boya, vernik, boya temizleme makinesi*

Design and Production of an Environmentally Friendly Cabin Type Full Automation Paint Removal Machine

ABSTRACT

The Effective and damage-free removal of deteriorated paint and varnish from wood surfaces is essential for both aesthetic and long-term use of the material. Commonly used methods such as scraping or sanding are labor intensive and time consuming. In addition, alternative solutions such as paint strippers pose significant threats to human health and the environment. To address these challenges, this study presents a novel solution: the Cabin Type Full Automation Paint Removal Machine (KATTABOT), designed and manufactured with the support of the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under project number 2210709. KATTABOT is designed to efficiently remove layers of paint and varnish from various materials, including wood, by spraying abrasive media onto the surface using compressed air. With the ability to control and adjust parameters such as removing pressure, nozzle diameter, removing angle, removing distance and feed rate, the machine offers flexibility for different paint removing scenarios. Furthermore, by contributing to the diversity of blasting media available, KATTABOT aims to provide an environmentally friendly solution for paint removal, benefiting various industries and research in this field.

Keywords: *Paint removal, paint, varnish, wood material, paint removal machine.*

I. GİRİŞ

Ağaç malzeme, doğal ve organik bir malzeme olup, doğadan doğrudan elde edilebilen ve biyolojik olarak sürekli yenilenebilen bir hammaddedir. Sahip olduğu benzersiz özellikler nedeniyle çok katlı yapılar, deniz taşıtları, uzay araçları ve müzik aletleri gibi geniş bir yelpazeyi kapsayan alanlardaki mühendislik çözümleri için idealdir [1], [2]. Kullanım alanlarının çeşitliliği nedeniyle, ahşap ve ahşap esaslı malzemeleri karşılaşacakları etkilere karşı korunur hale getirmek bir zorunluluktur. Uzun süreli hizmet ve koruma sağlamak için farklı türde koruyucular, boyalar ya da katman yapıcı özellikteki vernik uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır [3]–[5]. Ancak bu koruyucu katmanlar da maruz kaldıkları harici etkilere bağlı olarak zamanla koruyucu özelliklerini kaybedebilmektedir [6]. İşlevini kaybeden bu katmanların malzeme yüzeyinden temizlenmesi ve tekrar uygulanması hem estetik hem de malzemenin kullanım ömrünü uzatmak açısından bir gerekliliktir [7].

Eskimiş katmanların ağaç malzeme yüzeylerinden temizlenmesi yoğun emek ve zaman gerektiren oldukça zor bir süreçtir [8]. Küçük yüzeyler söz konusu olduğunda çeşitli kazıyıcı aletler, tel ve zımparalar gibi mekanik temizleyiciler ile temizlenebilmektedir. Ancak, yapı elemanları veya deniz araçları gibi büyük ölçekli yüzeylerde bu yöntemler çoğu zaman verimsizdir [9]. Ayrıca oymalı ve işlemeli yüzeylerdeki girintiler mekanik yöntemler ile çoğu zaman temizlenememektedir [10]. Bir diğer alternatif olan kimyasal yöntemlerin ise, çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilere sahip bileşenler ve toksik atıklar içermeleri nedeniyle, günden güne kullanımları sınırlandırılmaktadır [11].

Çevre bilincinin artması ile günümüzde çevre ve insan sağlığına etkisi olmayan boya temizleme yöntemleri ve makineleri ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Organik veya doğal içerikli boya çözücüleri, endüstriyel zımpara makineleri, basınçlı su jetleri gibi araçlarla son dönemde boya temizleme alanında ciddi gelişmeler kaydedilmektedir [12]–[14]. Ancak bunlar genellikle özel bazı amaçlar doğrultusunda ve spesifik koşullarda kullanılmak üzere geliştirilmiş yöntemlerdir. Bu sebeple, çevre dostu boya temizleme yöntemlerine yapılacak her katkı büyük önem arz etmektedir.

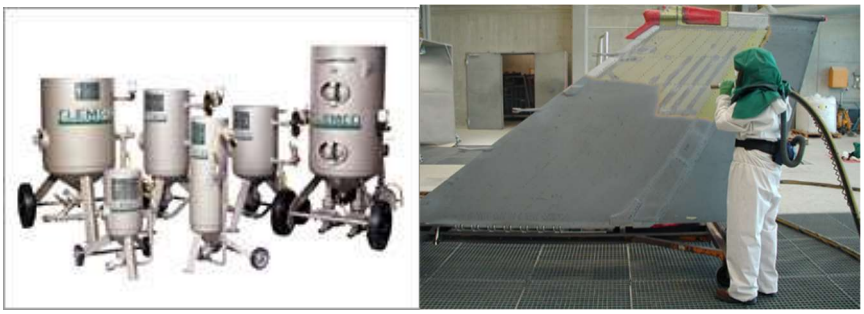
Temizlenecek yüzeyin özelliklerine göre farklı tipteki medyaların, basınçlı hava yardımı ile malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle gerçekleştirilen boya temizleme işlemi, farklı endüstri kollarında (havacılık, deniz taşıtları, otomotiv vb.) yaygın bir kullanıma sahiptir [15]. Bu yöntem, uygulama kolaylığı, ekonomikliği, farklı malzeme özelliklerine uygun medya seçimi sağlaması, boya katmanını malzeme yüzeyinden hızlı, etkili ve malzemeye zarar vermeden temizlemesi ile diğer yöntemlere kıyasla oldukça avantajlıdır [16]. Endüstride sıkça kullanılan temizleme makineleri ve medyalar genellikle metal, cam veya beton gibi sert yüzeyler için optimize edilmiştir [13]. Bu nedenle, ahşap gibi farklı teknik özelliklere sahip malzemelerin temizliğinde bu araçların kullanımı genellikle uygun değildir. Her ne kadar, temizleme başlığını elle tutarak yüzeyin serbest ve kontrolsüz olarak temizlenmesini sağlayan makinelerin bazı parametreleri ağaç malzeme için uyarlanabilse de doğrudan yüzey temizleme işleminde etkili parametrelerin kontrolünü sağlayan bir makine bulunmamaktadır. Ağaç malzeme gibi gündelik yaşamda pek çok amaçla kullanılan heterojen yapıdaki bir materyal için bu durum büyük bir dezavantajdır. Ayrıca mevcut makinelerin operatör bağımlı olması uygulamadan kaynaklı farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle parametrelerin otomatik olarak kontrol edildiği makinelere ciddi şekilde ihtiyaç bulunmaktadır. Sektördeki bu eksikliğin giderilmesi hem literatüre hem de üst yüzey ve ağaç işleri endüstrisine bir katkı olarak görülebilir.

Bu çalışmada, ağaç malzeme yüzeylerinde koruyucu özelliğini yitirmiş boya ya da vernik katmanları ile farklı özellikteki malzemelerin de temizlenmesinde kullanılabilecek bir makine tasarlanmış ve üretilmiştir. Benzerlerinden farklı olarak, yüzeye püskürtülen medyaların akışını sağlayan havanın basıncını (temizleme basıncı), nozul başlığındaki ağız açıklığını (nozul çapı), nozulun açısını (temizleme açısı), püskürtme uzaklığını (temizleme mesafesi) ve nozulun malzeme üzerindeki ilerleme hızını (temizleme hızı) operatörden bağımsız otomatik olarak ayarlamaya olanak sağlayan makine, hem endüstriyel amaçlı kullanılan medyalar hem de alternatif olarak kullanılabilecek medyalar için uygun bir altyapıya sahiptir. Bu sayede, çalışmanın hem boya temizleme endüstrisine hem de bu alandaki çalışmalara önemli bir katkı sunacağı düşünülmektedir.

II. BASINÇLI SİSTEMLER İLE BOYA TEMİZLEMEDE MEVCUT TEKNOLOJİLER

Basınçlı sistemler ile boya temizliği, basınçlı hava ile çeşitli büyüklüklerdeki medyaların kuru veya su ile karıştırılarak yüzeye püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Kullanılan medyaların çeşidi, püskürtmede kullanılan havanın basıncı ve tercih edilen nozul tipi, boyanın yüzeyden temizlenmesinde önemli rol oynamaktadır [17], [18]. 1990'lı yılların başlarında genellikle uçak yapımında kullanılan kompozit malzemelerin yüzeylerinden boya temizlemek için kullanılan bu yöntem, uygulama ortamındaki çeşitli olumsuzlukları gidermek ve daha verimli bir çalışma ortamı sunmak amacıyla kimyasal boya temizleme işlemlerine alternatif olarak ortaya çıkmıştır [19], [20]. Uygulamada seyyar tip (açık sistem) ve kabin tipi (kapalı sistem) olmak üzere iki farklı tipte makine kullanılmaktadır.

Seyyar boya temizleme makineleri (Şekil 1), açık bir sistemde çalışan, taşınabilir makinelere verilen genel bir isimdir. Bu makinelerin sahip oldukları tanklara medya beslemesi yapılır ve daha sonra basınçlı hava yardımı ile bu medyaların yüzeylere püskürtülmesi sağlanır [21].



Şekil 1. Seyyar boya temizleme makineleri ve örnek bir uygulama

Seyyar boya temizleme makinelerinin mobil yapıda olmaları sayesinde, boyaların temizlenmesi için herhangi bir sabit makineye ihtiyaç duyulmaz ve kumlama işleminin istenilen yerde yapılabilmesi sağlanır. Ancak bu makinelerin kullanımı esnasında püskürtülen medya ve temizlenen katmanlar partiküller halinde havada dağılabilir ve çalışma ortamının yüksek miktarda zararlı partiküller ile dolmasına sebep olabilir [16], [22]. Bu nedenle, kumlama işlemi sırasında koruyucu ekipmanların giyilmesi ve ortamın iyi havalandırılması önemlidir. Ayrıca bu makineler, temizleme işlemi esnasında yüksek seviyede gürültü nedeniyle çalışanların işitme sağlığını da olumsuz etkileyebilir [23]. Bunlara ek olarak, temizleme işlemi tamamen operatör tarafından yönetilir. Bu durum, hem operatörün tecrübesiyle ilişkili olarak standart olmayan sonuçlara sebep olabileceği gibi hem de hassas temizlik gerektiren yüzeylerde de risk oluşturabilir.

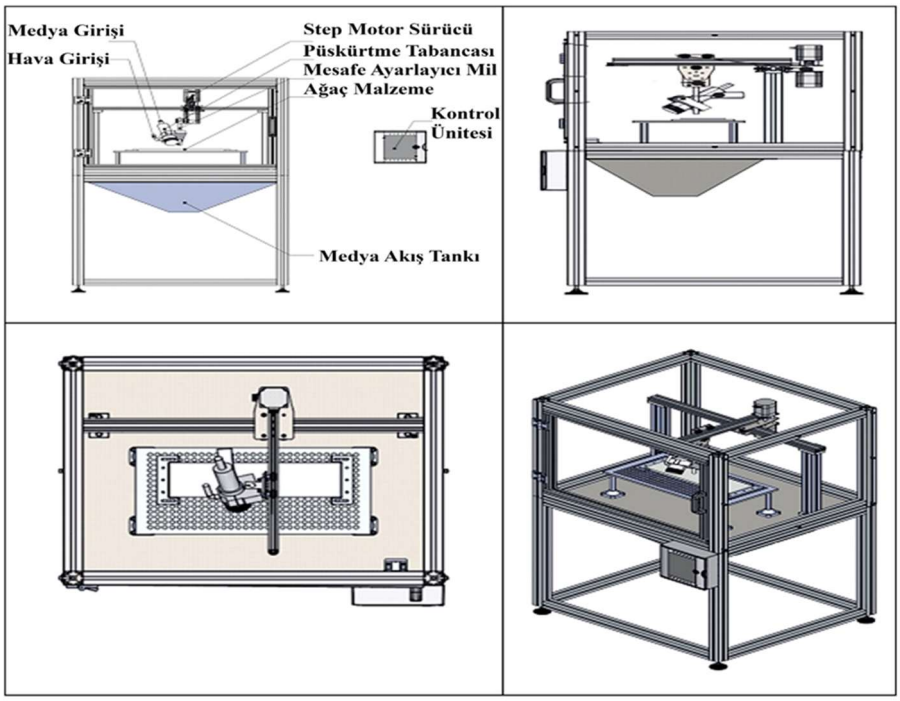
Kabin tipi yüzey temizleme makinelerinde, işlem sırasında açığa çıkan toz ve boya artıklarının makine içerisinde tutulmasını sağlayan kapalı bir kabin bulunmaktadır ve bu kapalı alanda temizleme işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2). Bu sayede, çalışma ortamının temiz kalması sağlanır ve işlemi gerçekleştiren operatörün toz ve boya artıklarına maruziyeti ortadan kaldırılarak sağlığının korunması amaçlanır [24]. Ancak mevcut makinelerde temizleme işleminin operatör tarafından serbest elle yapılması bir dezavantaj olarak göze çarpmaktadır. Bu makinelerin uzman personel tarafından doğru şekilde ayarlanması ve kullanılması önemlidir [25]. Aksi takdirde, temizlenen yüzeyler hasar görebilir veya medya parçacıkları yüzeye gömülerek daha sonraki boyama işlemleri için ön hazırlık işlemleri zorlaşabilir.



Şekil 2. Kabin tipi kumlama makinesi (Clemco International 2023).

III. KABİN TİPİ TAM OTOMASYON BOYA TEMİZLEME MAKİNESİ (KATTABOT)

Bu çalışmada, çeşitli koruyucu katmanların temizlenmesi amacı ile otomatik olarak boya temizleme işlemi yapabilen kabin tipi bir boya temizleme makinesi tasarlanmış ve üretilmiştir. (Şekil 3 ve 4). Makinenin modellenmesi, projelendirmesi ve simüle edilmesinde Solidworks ve Sketch Up 3 boyutlu modelleme programları kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sayesinde üretim sırasında sorun teşkil edebilecek hususlar henüz tasarım aşamasında fark edilerek bunlara yönelik çözümler geliştirilmiştir. Makinenin ticari potansiyeli göz önünde bulundurularak ismi "Kabin Tipi Tam Otomasyon Boya Temizleme Makinesi" teriminin akronimi olan "KATTABOT" olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. KATTABOT'un tasarımı

Kapalı bir kabin içerisinde 3 eksende hareket edebilen bir temizleme başlığı yardımıyla boya temizleme işlemini gerçekleştirebilen makine, temizlemeye etki eden tüm parametrelerin değiştirilmesine imkân sağlamaktadır. Temizleme hızını kontrol edebilmek adına, püskürtme başlığının ilerleme hızı (m/dk) ayarlanabilmektedir. Yüzeye püskürtülecek medyanın yoğunluğuna veya geometrik özelliklere bağlı olarak basınç, açı ve uzaklık parametreleri de ayarlanabilmektedir.



Şekil 4. KATTABOT

Halihazırda boya temizleme işlemlerinde kullanılmakta olan demir bilye, kum, cam küre gibi yüksek yoğunluklu medyalar ağaç malzeme gibi düşük yoğunluklu heterojen yapıdaki malzeme yüzeylerini tahrip etmekte ve beklenen temizleme performansı elde edilememektedir [26]. Özellikle silika gibi küçük boyutlu partiküller kolayca havaya karışabilmekte ve uygulama yapan kişilerde silikozis gibi kalıcı ve ölümcül sağlık problemlerine yol açabilmektedir [27]–[29]. KATTABOT ile insan ve çevre sağlığını tehdit eden kimyasalların kullanılmaması, temizleme medyası olarak atık olarak nitelendirilebilecek, ekonomik ve çevresel katkı sağlayan tarımsal atıkların değerlendirilmesi ve bu sayede endüstriye kazandırılması planlanmıştır. Bu bağlamda, alternatif medyaların da kullanımına imkân sağlayacak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Düşük miktarda atık oluşumu sayesinde insan ve çevre sağlığını etkileyecek partiküllerin en aza indirilmesini sağlamak makinenin temel hedefleri arasındadır. Ayrıca, KATTABOT ile çevreci doğal medyaların kullanılabilirliği de mümkün hale gelmektedir.

KATTABOT temelde ahşap yüzeylerden boya temizliği için tasarlanmış olmasına rağmen plastik, metal vb. malzemelerin temizlenmesinde de kullanılabilecek bir altyapıya sahiptir. Bu sayede geniş bir kullanım alanına sahip olması beklenmektedir.

3.1. Makinenin Çalışma Prensibi

KATTABOT'un çalışma prensibi; medya tankında bulunan medyaların basınçlı hava gücü ile örnek yüzeylerine istenilen açı, mesafe, basınç ve ilerleme hızında püskürtülerek bu yüzeylerde bulunan eskimiş koruyucu katmanları yüzeyden kaldırarak temizleme esasına dayanmaktadır. Basınçlı sistemler ile yüzey temizleme işleminde temizleme açısı, temizleme mesafesi, temizleme basıncı ve ilerleme hızı en önemli parametreler olarak ön plana çıkmaktadır [18]. Literatür incelendiğinde, bu parametrelerin temizlenmiş yüzeylerin renk, parlaklık ve pürüzlülük değerleri üzerinde oldukça etkili olduğu bildirilmiştir [30], [31]. Bunların doğru şekilde seçilmesi sayesinde, boya temizleme işlemi sonrasında malzemenin yeni uygulanacak üst yüzey işlemine hazırlık sürecinin kısalacağı düşünülmektedir. Proje kapsamında üretilen makinenin endüstrideki benzerlerinden farklı yönleri çalışmanın sonraki kısmında başlıklar halinde verilmiştir.

3.1.1. Ayarlanabilir Temizleme Açısı

Endüstride kullanılan yüzey temizleme makinelerinde temizleme işlemi serbest elle gerçekleştirilmektedir. Bu durum hem yüzeyde yeknesak bir temizlik yapılmasına engel olmakta hem de operatöre bağlı olarak farklı sonuçlar elde etmeye neden olmaktadır. Yapılan farklı çalışmalar, temizlik açısı değiştikçe yüzey özelliklerinin değiştiğini ortaya koymaktadır (Satıcı 2004; Fo[31]–[33]. KATTABOT'un istenilen açılarda temizleme işlemi gerçekleştirilebilmesi hem endüstrideki benzerlerinden farklı olmasını sağlamakta hem de en etkin temizleme açısının belirlenmesine olanak sunmaktadır. KATTABOT'un temizleme başlığı, üzerinde farklı açıların gösterildiği bir açı ayarlama aparatına entegre edilmiştir (Şekil 5). Bu sayede farklı yüzey veya medyalar için farklı açılarda temizleme işlemi yapılması mümkün olmaktadır.



Şekil 5. Temizleme açısı ayarlama aparatı ve kullanımı

3.1.2. Değiştirilebilir Temizleme Mesafesi

Boya temizleme işleminde medya püskürtme işini gerçekleştiren temizleme başlığının (nozul) temizlenecek parçaya olan mesafesi, malzeme yüzeyinin her bölgesinin etkili bir şekilde temizlenmesi ve püskürtülen medyanın yüzeye maksimum enerji transferi sağlayabilmesi açısından kritik bir faktördür. Nozul ucu ile malzeme yüzeyi arasındaki mesafe azaldıkça birim alana daha fazla medya isabet etmekte ancak etkin çalışma alanı küçülmektedir. Bu nedenle, temizleme işleminin örnek yüzeyinde olabildiğince

geniş alanda gerçekleştirilebilmesi için temizleme mesafesinin ayarlanabilir olmasının önemi büyüktür [30].

KATTABOT, boya temizleme işlemini farklı eksenlerde kolayca yapabilmek amacıyla tahrik gücü yüksek step motorlarla donatılmıştır (Şekil 6). Bu motorların aracılığı ile oluşturulan doğrusal hareketle, istenilen mesafelerde etkili bir temizleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



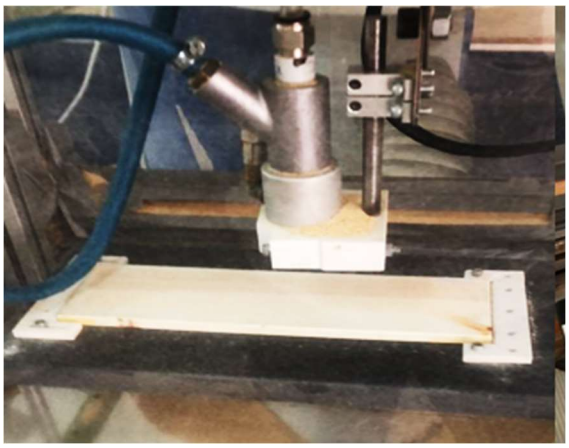
Şekil 6. Hareket motorları ve tahrik sistemi

3.1.3. Ayarlanabilir İlerleme Hızı

Boya temizleme işleminde ilerleme hızının belirlenmesi ve işlemin otomatik bir şekilde başlatılıp sonlandırılması için evrensel G kodu göndericisi kullanılmıştır. G kodu göndericisi, evrensel seri yolu üzerinden iletişime geçtiği kod yorumlayıcı makineye (örneğin, 3D yazıcı, CNC torna veya freze makinesi) koordinat kodlarını göndererek onları yönetmeye yarayan bir arayüz sağlar. Kullanılan bu arayüz sayesinde, G kodlarının doğruluğu ve etkileşimi kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, makinenin hangi işlemi gerçekleştirdiği anlık olarak görüntülenebilmekte ve temizleme işlemine anlık olarak müdahale edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Üretilen makinede kullanılan evrensel G kodu göndericisi açık kaynak kodlu olup, fiziksel kontrol panosunun yerine kullanılmakta ve bilgisayar veya mobil cihazlar üzerinden işlem gerçekleştirilebilmektedir.

3.1.4. Parça Sabitleme Aparatları

Boya temizleme işlemi, kabin içerisine temizlenecek malzemenin sabit bir şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Kabin içerisinde bulunan delikli sac plakanın üzerinde temizleme işlemi gerçekleştirilecek parçanın büyüklüğüne göre istenilen mesafelerde yerleştirilebilen parça tutucular tasarlanmıştır. Bu sayede farklı boyut ve geometrilere sahip örneklerin yüzeyleri temizlenebilmektedir. Ayrıca, üretilen makine, çeşitli malzeme geometrileri için farklı türdeki sabitleme aparatlarının kullanımına da uygun bir altyapıya sahiptir.



Şekil 7. Parça sabitleme aparatları ve kullanımı

3.1.5. Toz Emme Sistemi

Toz emme sistemi, toz ve partiküllerin havadan emilip, filtre edilerek temiz hava ile atılmasını amaçlayan bir sistemdir. Bu sistemler, genellikle endüstriyel üretim ortamlarında, yüksek toz seviyelerine sahip çalışma alanlarında ve bazı inşaat işlerinde kullanılmaktadır.

Basınçlı sistemler ile malzeme yüzeylerinde bulunan eskimiş katmanların temizlenmesi işleminde yaşanan en büyük sorunların başında, çalışılan ortamın kalitesini düşüren ve çevre ve insan sağlığı açısından tehdit oluşturan toz ve partiküller gelmektedir. KATTABOT, ortamda toz ve partikül oluşumunu minimum seviyede tutmak amacıyla kapalı kabin tipi olarak tasarlanmıştır. Kabin içerisindeki toz ve partikülleri ortadan kaldırmak amacıyla makineye toz emme sistemi entegre edilmiştir. Bu sayede işlem esnasında ortaya çıkan tüm partiküller ayrı bir hazneye hapsedilmektedir.

IV. ÖN ÇALIŞMALAR VE MAKİNENİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Makinenin üretimi sonrası performans değerlendirmesi yapmak adına örnek parçalar üzerinde ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Ön çalışmalar

Yapılan ön çalışmalarda farklı medyalar kullanılarak yüzeylerde farklı parametrelerde temizleme işlemi gerçekleştirilmiş ve temizlenmiş örnek yüzeylerinin renk, parlaklık, sertlik, yüzey aşınma miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucundan denemelerde kullanılan parametrelerin ve farklı tipteki medyaların yüzeyler üzerinde farklı seviyelerde etkili olduğu ve farkların da istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Ön çalışmalar sonucunda temizleme açısının, yüzeyin aşınma miktarını etkilediği ve açı azaldıkça yüzeyde daha az deformasyon oluşmasına rağmen temizleme işleminin etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Sert yüzeylerde 90 derece veya yakın açıların daha etkili temizleme işlemi gerçekleştirmesi çalışmadaki ön testlerden elde edilen bir diğer gözlemdir.

Medyaların yüzeye püskürtülmesi sırasında hava basıncı arttıkça, boya daha etkili bir şekilde temizlenmektedir. Sert yüzeyler için yüksek basınçlar, yumuşak yüzeyler için ise düşük basınçlar kullanıldığında yüzeylere fazla zarar vermeden temizleme yapılabildiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan, yüksek basınçların özellikle yumuşak odun dokularında ciddi deformasyona sebep olabildiği belirlenmiştir.

Nozul çapının artmasının temizlemenin etkisini azaltıcı etkisi olduğu ancak bu değer azaldıkça temizleme süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Basınç ile nozul çapı arasındaki ilişki, medyanın sahip olduğu kinetik enerjiyi etkilediğinden, farklı basınç ve nozul çapı kombinasyonlarının farklı yüzeylerde kullanılabileceği ve makinenin sahip olduğu teknik altyapı sayesinde çok geniş bir aralıkta bu kombinasyonları uygulama imkânı sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, temizleme mesafesi azaldıkça, medyaların yüzeye daha fazla etki ettiği saptanmıştır. Ancak temizleme mesafesi arttıkça yüzey etki alanı arttığından işlem zamanından tasarruf edilebildiği ve bu nedenle temizleme mesafesinin malzeme ve medyaya göre seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

V. SONUÇLAR

KATTABOT, ahşap yüzeylerde boya temizleme işleminin etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayan ve büyük bir potansiyele sahip olan endüstriyel bir çözümdür. Farklı parametrelerin kontrol edilebilirliği sayesinde sadece ahşap yüzeylerle sınırlı kalmadan metal, plastik, taş gibi çeşitli malzemelerin boya ve vernik katmanlarını temizleme kapasitesine sahiptir. Özellikle ağaç malzemeler gibi heterojen özelliklere sahip yüzeylerdeki eskimiş koruyucu katmanların temizleme parametrelerinin belirlenmesi gereken bir sektörde büyük bir ihtiyacı karşılayabilir.

Bununla birlikte, KATTABOT'un potansiyelini daha da artıran bir diğer faktör, çeşitli medya seçeneklerinin kullanılabilmesi ve temizleme işleminin çevre ve insan sağlığına dostu olmasıdır. Bu nedenle, bu makinenin üretim ve kullanımı, sadece üniversiteler ve boya/vernik üreticileri için değil, aynı zamanda mobilya ve dekorasyon endüstrisi gibi birçok sektör için önemli fırsatlar sunma potansiyeline sahiptir. Makinenin mevcut yapısı üzerine ek olarak, görüntü işleme teknolojileri ve siklon toz emicilerle entegrasyonlar gibi geliştirmeler, daha hassas ve çevre dostu temizleme çözümleri sunma yeteneğini daha da artırabilir.

VI. ÇIKARIM

KATTABOT, çeşitli yüzeylerdeki boya ve vernik katmanlarını etkin bir şekilde temizleyebilen endüstriyel bir makinedir. Bu makine, ahşap başta olmak üzere metal, plastik ve taş gibi farklı malzemeler üzerinde uygulanabilirliği ile dikkat çekmektedir. KATTABOT'un çevresel ve sağlık dostu temizleme yöntemleri sunabilmesi ve gelişmiş teknolojik entegrasyonlarla donatılma potansiyeli, onu akademik çevreler ve geniş bir endüstri yelpazesi için değerli hale getirmektedir. Bu özellikler, KATTABOT'un endüstriyel temizleme alanında önemli bir yenilikçi potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından desteklenmiştir. Proje No: 221O709

KAYNAKLAR

[1] M. Budakçı ve M. Karamanoğlu, "Effects of weathering on some physical properties of wood", *Kastamonu Univ. For. Fac. J.*, c. 14, sayı 1, ss. 37–47, 2014.

[2] E. Korkmaz, C. Özcan, ve M. Korkmaz, "An application of fuzzy soft sets to a real-life problem: Classification of wood materials to prevent fire-related injuries and deaths", *Appl. Soft Comput.*, c. 132, s. 109875, 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109875.

[3] M. Budakçı ve A. Togay, "The color changing effect of outdoor conditions on synthetic varnish and a diffusion paint applied scotch pine", *J. Ind. Arts Educ. Fac. Gazi Univ.*, c. 11, sayı 10, ss. 55–68, 2002.

[4] H. Çetin, "Physical and chemical analysis of softwoods exposed to marine borers", Master's Thesis, Natural and Applied Science, Bartın University, Bartın, Türkiye, 2009.

[5] Ö. Özgenç, Ü. C. Yıldız, ve S. Yıldız, "The wood surface protection with some new generation wood preservatives and coating processings against weathering conditions", *Artvin Coruh Univ. J. For. Fac.*, c. 14, sayı 2, ss. 203–215, 2013, doi: 10.17474/acuofd.83528.

[6] A. Kılıç ve H. Hafızoğlu, "Influences of Weathering on Chemical Structure of Wood and Protection Treatments", *Turkish J. For.*, c. 8, sayı 2, ss. 175–183, 2007.

[7] R. M. Murodovna ve K. G. Sergeevna, "Wood – as A Decorative Material of the Interior", *Int. J. Integr. Educ.*, c. 5, sayı 3, ss. 310–315, 2022.

[8] K. D. Weeks ve W. D. Look, *Exterior Paint Problems on Historic Woodwork*, sayı 10. 1982. [Çevrimiçi]. Available: https://www.nps.gov/tps/how-to-preserve/briefs/10-paint-problems.htm

[9] A. Echt, K. H. Dunn, ve R. L. Mickelsen, "Automated Abrasive Blasting Equipment for Use on Steel Structures", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, c. 15, sayı 10, ss. 713–720, Oca. 2000, doi: 10.1080/10473220050129310.

[10] J. H. Wynne, "Interim Report on Scientific Basis for Paint Stripping : Mechanism of Interim Report on Scientific Basis for Paint Stripping : Mechanism of Methylene Chloride Based Paint Removers", 2010.

[11] G. X. Chen, T. J. Kwee, K. P. Tan, Y. S. Choo, ve M. H. Hong, "Laser cleaning of steel for paint removal", *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, c. 101, sayı 2, 2010, doi: 10.1007/s00339-010-5811-0.

[12] E. Carretti, R. Giorgi, D. Berti, ve P. Baglioni, "Oil-in-Water Nanocontainers as Low Environmental Impact Cleaning Tools for Works of Art: Two Case Studies", *Langmuir*, c. 23, sayı 11, ss. 6396–6403, May. 2007, doi: 10.1021/la700487s.

[13] M. Z. Li *vd.*, "Feasibility study of a new approach to removal of paint coatings in remanufacturing", *J. Mater. Process. Technol.*, c. 234, ss. 102–112, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.03.014.

[14] M. Baglioni, G. Poggi, R. Giorgi, P. Rivella, T. Ogura, ve P. Baglioni, "Selective removal of over-paintings from 'Street Art' using an environmentally friendly nanostructured fluid loaded in highly retentive hydrogels", *J. Colloid Interface Sci.*, c. 595, ss. 187–201, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.jcis.2021.03.054.

[15] P. Srinivas Reddy *vd.*, "Effect of parameters and surface analysis on eglin steel by shot blasting method", *Mater. Today Proc.*, c. 2022, sayı xxxx, ss. 2–5, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.248.

[16] D. Efremov ve A. Gerasimova, "Shotblasting process for surface hardening", *Mater. Today Proc.*, c. 38, ss. 1685–1688, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.210.

[17] J. Deng, Y. Feng, P. Shi, ve Z. Ding, "Erosion wear of ceramic nozzles in sand blasting treatments", *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ J. Chinese Ceram. Soc.*, c. 31, sayı 5, ss. 494–497, 2003.

[18] R. C. Tucker, "Introduction to Coating Design and Processing", *Therm. Spray Technol.*, c. 5, ss. 76–88, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005725.

[19] K. M. Foley ve T. Weaver, "An Update on Soft Grit Blast Cleaning with Corncob Grit", *Abras. Eng. Soc.*, ss. 107–116, 1981.

[20] D. Hansel, "Abrasive blasting systems", *Met. Finish.*, c. 98, sayı 6, ss. 26–42, 2000, doi: 10.1016/s0026-0576(00)80389-x.

[21] R. Kohli, "Microabrasive Technology for Precision Cleaning and Processing Applications", içinde *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques*, Elsevier, 2019, ss. 509–548. doi: 10.1016/B978-0-12-815577-6.00013-X.

[22] W. Wang *vd.*, "Research on very volatile organic compounds and odors from veneered medium density fiberboard coated with water-based lacquers", *Molecules*, c. 27, s. 3626, 2022, doi: 10.3390/molecules27113626.

[23] C. Le Nué *vd.*, "Influence of grinding and shot-peening on the near-surface microstructure of a maraging stainless steel", *Materialia*, c. 20, sayı September, s. 101220, 2021, doi: 10.1016/j.mtla.2021.101220.

[24] E. E. Phillips, R. Murphy, J. Connors, K. F. McMullen, E. Jacques, ve J. C. Bruhl, "Experimental evaluation of OSB-faced structural insulated panels subject to blast loads", *Eng. Struct.*, c. 229, sayı December 2020, s. 111597, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111597.

[25] S. Rosenberg, B., Yuan, L., and Fulmer, "Ergonomics of abrasive blasting: A comparison of high pressure water and steel shot", *Appl. Ergon.*, c. 37, sayı 5, ss. 659–667, 2006.

[26] K. Abbott, "Plastic media blasting", *Met. Finish.*, c. 98(6), ss. 485–492, 2000.

[27] A. K. Madl *vd.*, "State-of-the-science review of the occupational health hazards of crystalline silica in abrasive blasting operations and related requirements for respiratory protection", *J. Toxicol. Environ. Heal. - Part B Crit. Rev.*, c. 11, sayı 7, ss. 548–608, 2008, doi: 10.1080/10937400801909135.

[28] K. M. Bang *vd.*, "Silicosis mortality trends and new exposures to respirable crystalline silica - United States, 2001-2010.", *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, c. 64, sayı 5, ss. 117–20, 2015, [Çevrimiçi]. Available: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25674992%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC4584686

[29] K. Madl, A.K., Carosino, C., Pinkerton, *Particle Toxicities*, Second Edi., c. 4, sayı 1. New York: Elsevier, 2010.

[30] S. Bouzid ve N. Bouaouadja, "Effect of impact angle on glass surfaces eroded by sand blasting", *J. Eur. Ceram. Soc.*, c. 20, sayı 4, ss. 481–488, 2000, doi: 10.1016/s0955-2219(99)00140-5.

[31] M. E. Satıcı, "Kumlama işleminin ve bu işleme etkiyen parametrelerin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2004.

[32] A. P. N. Fonte, M. P. Rocha, P. H. G. Cademartori, ve R. A. M. dos Anjos, "Influence of Abrasive Blasting and Hot Pressing Preparation on the Pinus taeda Wood Surface", *Floresta e Ambient.*, c. 29, sayı 3, 2022, doi: 10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0041.

[33] J. Li, X., Tang, K., He, L., Shao, H., Wang, Y., He, Y., ... & Xie, "Effect of sand blasting treatment on green colour preservation and surface characteristics of Moso bamboo culms", *Eur. J. Wood Wood Prod.*, ss. 1–8, 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Düzce Üniversitesi Kampüs İçi Atık Toplama Merkezinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Yer Seçimi

Emine Baykaptan[a], İrem Düzdar[a], Nilüfer Ülgüdür[b], Vildan Zülal Sönmez[b], Oğuz Şahiner[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar: iremduzdar@duzce.edu.tr**

ÖZET

Günümüzde sürdürülebilir çevre politikalarının önemi artmaktadır. Bu politikaların en önemlilerinden biri Sıfır Atık projesidir. Sıfır Atık projesi meydana gelen atık miktarının azaltılmasını ve kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlamaktadır. Bu projenin kilit noktalarından biri atık toplama merkezleridir. Atık toplama merkezleri, atıkların toplanması, sınıflandırılması ve işlenmek üzere uygun tesislere taşınması için kullanılan merkezlerdir. Atık toplama merkezinin yeri, çevredeki insanların sağlığını ve güvenliğini etkileyebilecek faktörler göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Atık toplama merkezinin doğru konumda olması ile çevresel etkiler en aza indirilebilmektedir.

Düzce ilinin coğrafi konumu, sanayi faaliyetleri ve doğal güzellikleri dikkate alındığında, atık toplama merkezlerinin yer seçimi önem arz etmektedir. Kampüs içinde atık toplama merkezi yer seçiminin doğru yapılması ile, uzun vadede sürdürülebilir atık yönetimine zemin hazırlanmaktadır. Diğer taraftan, yer seçimi problemlerinde birçok kriterin aynı anda değerlendirilmesi gerekmektedir. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (ÇKKV) birçok kriterin eş zamanlı değerlendirilmesine olanak vermekte ve nesnel bir karar verme süreci geçirmeye olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Düzce Üniversitesi kampüsü içi en uygun atık toplama merkezi yer seçiminin ÇKKV yöntemleri kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmaya katılan karar vericiler, belirlenen 3 ana ve 13 alt kriterin önem düzeylerini ve 3 farklı yer alternatifini değerlendirmiştir. Yapılan analizler ile, en uygun alternatif belirlenmiş olup, ÇKKV'nin atık toplama merkezlerinin belirlenmesinde nesnel bir yaklaşım için etkin bir yöntem olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *AHP, Atık toplama merkezi, ÇKKV, Yer seçimi*

The Site Selection for the Waste Collection Center within Duzce University Campus Using Multi-Criteria Decision Making Method

ABSTRACT

The importance of sustainable environmental policies is increasing nowadays. One of the most important factors of these policies is the Zero Waste Project. The Zero Waste Project aims to reduce the amount of waste generated and to utilize resources efficiently. One of the key aspects of this project is waste collection centers. Waste collection centers are facilities used for the collection, sorting, and transportation of waste to appropriate processing facilities. The location of waste collection centers should be selected considering factors that may affect the health and safety of the surrounding community. The proper location of waste collection centers minimizes the related impacts on the environment.

The selection of the location of waste collection sites becomes crucial in Düzce considering the province's geographical location, industrial activities, and natural values. Establishing a waste collection center at the right location on campus paves the way for sustainable waste management in long-term. However, many criteria should be evaluated simultaneously in site selection problems. Multi-criteria decision making analysis (MCDM), allows the simultaneous evaluation of many criteria and enables an objective decision-making process. In this study, it was aimed to determine the most suitable waste collection center location within Düzce University campus by using MCDM methods. Decision makers participating in the study evaluated the importance levels of 3 main and 13 sub-criteria and 3 different location alternatives. The most

suitable alternative was determined with the analyses of the data obtained. MCDM decided as an effective method for an objective approach in site selection of waste collection centers.

Keywords: *AHP, MCDM, Site selection, Waste collection center*

I. GİRİŞ

Yıllar geçtikçe nüfusun artması, sanayilerin çoğalması gibi çeşitli nedenlerden dolayı atık miktarı artmaktadır [1]. Ülkemizde ve dünyada uygulanan Sıfır Atık projesi meydana gelen atık miktarının azaltılmasını, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesine yardımcı olmaktadır [2]. Kaynağında ayrıştırma faaliyetleri, atıkların üretildikten sonra yönetimi için gerçekleştirilen ilk süreç niteliğindedir. Bu süreçte, atıklar belli türler için renk kodlarına göre ayrılmış atık ayrıştırma kutularında toplanmaktadır. Sonrasında türlerine göre ayrıştırılmış olan atıklar, atık toplama merkezlerine getirilmektedir. Atık toplama merkezleri, atıkların tekrar ekonomiye kazandırılması için ilk adımın atıldığı yerlerdir [2]. Dolayısı ile söz konusu merkezler, sıfır atık prensibiyle uyumlu bir şekilde atıkların toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüşüm süreçlerinin başlatıldığı tesisler olarak ifade edilebilmektedir.

Düzce ili doğal güzellikleri, yeşil alanları, tarımsal faaliyetleri ve tarihi kültürel zenginlikleri ile akla gelen bir şehirdir. Ancak hızla artan nüfus ve ekonomik faaliyetler sonucu, ilde oluşan atık miktarı da artmaktadır. Artan atık miktarları ise, çevre kirliliğine ve doğal yaşamın zarar görmesine neden olabilmektedir. Atıklar, atık yönetimi ilkeleri doğrultusunda, Düzce ilinde çevre ve insan sağlığı için risk oluşturmadan toplanmalıdır [3]. Diğer taraftan, Üniversite kampüsleri yoğun atıkların çıktığı yerlerdir [4]. Ayrıca, kampüslerde oluşan atıkların düzenli bir şekilde toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüşüm tesislerine ve bertaraf mercilerine tesliminin sağlanması ile doğru atık yönetimi uygulamalarında rol model olabilecek kurumlardır. Bu kapsamda, ilgili her seçimin bilimsel yöntemlerle ifade edilebilmesi ise, çevre ve sağlık açısından güvenilebilirliği arttırmaktadır.

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (ÇKKV) birkaç opsiyon arasından birinin seçimi sürecinde, birden fazla kriteri dikkate alarak en iyi alternatifi belirlemeyi amaçlayan temel karar verme yöntemlerinden biridir. ÇKKV, çok çeşitli araç ve yöntemlerle finanstan mühendislik tasarımına kadar farklı alanlarda uygulanabilmektedir (Tablo 1) [5]. Örneğin, yenilenebilir hibrit enerji santrali yeri seçimi, 6 adet kriter ve dokuz adet alternatif ile analitik hiyerarşi prosesi (AHP), Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği (TOPSIS) ve Karmaşık Orantılı Değerlendirme (COPRAS) ÇKKV yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir [6]. İlaveten, Çok Kriterli Karar Verme ve Uzlaşma Çözümü (VIKOR) yöntemi kullanılarak Ankara'da, afet sonrasında sağlık hizmetlerine erişim sağlamak için alternatif sağlık merkezi yerleri belirlenebilmiştir [7]. Diğer bir çalışmada, Tercih Sıralama Organizasyonu Yöntemi ile Zenginleştirme Değerlendirmeleri (PROMETHEE) sıralama yöntemi ile kırtasiye ürünleri yapan bir fabrika için kuruluş yeri seçimi, VISUAL PROMETHEE programı yardımıyla analiz edilmiştir [8]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde (Tablo 1), AHP yönteminin sıklıkla uygulandığı görülmektedir. AHP, 1970'li yılların başında, ÇKKV problemleri çözmek ve karmaşık karar yapılarını analiz etmek için Thomas L. Saatly tarafından geliştirilen matematiksel yöntemdir [9]. Bu yöntemle birlikte karar verme sürecindeki farklı kriterlerin ve alternatiflerin göreceli önemleri belirlenebilmekte ve bu önemlerin ölçülmesi kolaylaşmaktadır.

ÇKKV yöntemlerinin atıklarla ilgili olabilecek yer seçimi işlemlerinde kullanılması da mümkündür. Örneğin, tehlikeli madde depo yeri seçimini yapabilmek için AHP ve Analitik Ağ Prosesi (ANP) yöntemleri kullanılmış, karşılaştırılmış ve en uygun depo yerine kadar verilmiştir [9]. Fakat, özellikle atık yönetimini ilgilendiren konularda kriterlerin seçimi kritik öneme sahiptir. AHP ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanıldığı ve düzenli depolama tesisi yer seçiminin yapıldığı bir çalışmada, yönetmelikteki kriterlerin yetersiz olduğu saptanmıştır. Ek olarak, pek çok yönetmelikte yer almayan unsurların da dikkate alınması ve çok disiplinli uzman ekiplerle halkın sürece katılmasının gerekliliği belirlenmiştir [10].

Tablo 1. ÇKKV yöntemi ile ilgili çalışmalar ve kullanılan ÇKKV yöntemleri.

ÇKKV yöntemi	Uygulama alanı	Kaynaklar
AHP, TOPSIS, COPRAS	Hibrit Enerji Santrali yeri seçim problemi	[6]
VICTOR	Sahra hastanesi yer seçimi	[7]
PROMETHEE	Üretim yapan bir fabrika için yeri seçim problemi	[8]
AHP, ANP	Tehlikeli madde depo yeri seçim problemi	[9]
CBS, AHP	Entegre katı atık yönetiminde düzenli depolama tesisi yer seçimi	[10]

Kümeleme Analizi Ağırlık Merkezi Yöntemi	Afet İstasyonu ve Toplama Merkezi için yer seçimi.	[11]
Bulanık TOPSIS	Afet sonrası geçici barınma alanlarının seçimi	[12]
Bulanık COPRAS	Özel bir hastanenin yer seçimi	[13]
AHP, ELECTRE, TOPSIS	Lojistik köyü yer seçimi	[14]
MOORA, OCRA	İlaç depo yeri seçim problemi	[15]
Gri Temelli TOPSIS	Depo yeri seçimi	[16]

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi Konuralp kampüs içi en uygun atık toplama merkezi yer seçimi yapılması ve atık toplama merkeziyle çevresel etkileri en aza indirerek daha temiz bir kampüs ortamı oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamında, ana ve alt kriterlerin hiyerarşik yapıda olması ve alternatiflere ilişkin öncelik sıralarını belirleyebilmek adına AHP ile ÇKKV yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda, üç farklı lokasyon için, 3 ana kriter ve 13 alt kriter grubu ile model kurulmuştur.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada en uygun atık toplama merkezi yerini belirlemek için AHP yöntemi uygulanmıştır. Atık toplama merkezinin yerine dair karar verme sürecinde kullanılacak kriterler belirlenmiş ve bu kriterlerin öncelik sıralaması yapılmıştır. Hiyerarşik yapı oluşturulurken, yapının en üst seviyesinde ulaşılması gereken hedef, bu hedefin altında, ana kriterler ve alt kriterler konumlandırılmıştır. En son alternatifler eklenerek hiyerarşik yapı tamamlanmıştır. Karşılaştırılan kriterlerin birbirleriyle olan önceliklerinin belirlenmesi için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. İkili karşılaştırma matrisi 9 karar vericiye uygulanmıştır. İkili karşılaştırmalar yapılırken Saaty'nin 1-9 puanlı önem derecelerini içeren tercih ölçeğinden yararlanılmıştır (Tablo 2). Karar vericiler, her kriter çifti için bir kriteri tercih etmiş ve ne kadar daha önemli olduğunu belirlemişlerdir.

Tablo 2. Tercih Ölçeği Tablosu [7,9]

Dereceler	**Tanım**
1	Eşit Önemde
3	Orta Önemde
5	Gerekli veya Güçlü Önemde
7	Çok Güçlü Önemde
9	Son Derece Güçlü Önemde
2-4-6-8	Ara değerler

İkili karşılaştırma matrisinin uygulanmasından sonra, matristeki her eleman kendi sütun toplamına bölünerek matris normalize edilmiştir (Denklem 1).

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \, , i,j = 1,2,\dots,n \qquad \text{(Denklem 1)}$$

Normalize edilmiş matrisin satırlarının toplamı, matrisin boyutuna bölünerek ortalama değeri elde edilmiştir (Denklem 2). Bulunan değer kriterin önem ağırlığını ifade etmektedir. Bu ağırlıklar, öncelik vektörünü oluşturmaktadır.

$$w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} a'_{ij} \;\; , \; i,j = 1,2,\dots,n \qquad \text{(Denklem 2)}$$

Karar vericinin kriterleri karşılaştırırken tutarlılık düzeyini değerlendirilmesi için tutarlılık indeksi (CI) (Denklem 3) hesaplanmıştır. Tutarlılık oranının 0,10'u aşması halinde, verilerde tutarsızlık olduğu anlamına gelmekte ve matrise girilen değerlerin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

$$Cl = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \qquad \text{(Denklem 3)}$$

CI denkleminde yer alan, λ_{max} değerinin hesaplanmasında Denklem 4 kullanılmıştır.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}w_j}{w_j}\right) \quad \text{(Denklem 4)}$$

Tutarlılık oranının (CR) hesaplanmasında takipteki denklem kullanılmıştır. Rassal İndeks (RI) denklemde belirtilen, n sayısına göre oluşturulmuş ikili karşılaştırma matrislerinin ortalamasını ifade eder. Çeşitli n'ler için RI değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

$$CR = \frac{Cl}{Rl} \quad \text{(Denklem 5)}$$

Tablo 3. Rassal Değer İndeksi (Rl) [9,10]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rl	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,41	1,45	1,49

III. SONUÇLAR

Düzce Üniversitesi Konuralp kampüs içi atık toplama merkezi yer seçimi için, kampüs alanı içerisinde üç alternatif bölge belirlenmiştir (Şekil 1). Belirlenen bölgelerin AHP yöntemiyle değerlendirilmesi amacıyla, ana ve alt kriterler oluşturulmuştur.



Şekil 1. Düzce Üniversitesi Kampüsü Alternatif Atık Depolama Alanları

A. Ana Kriterlerin Belirlenmesi

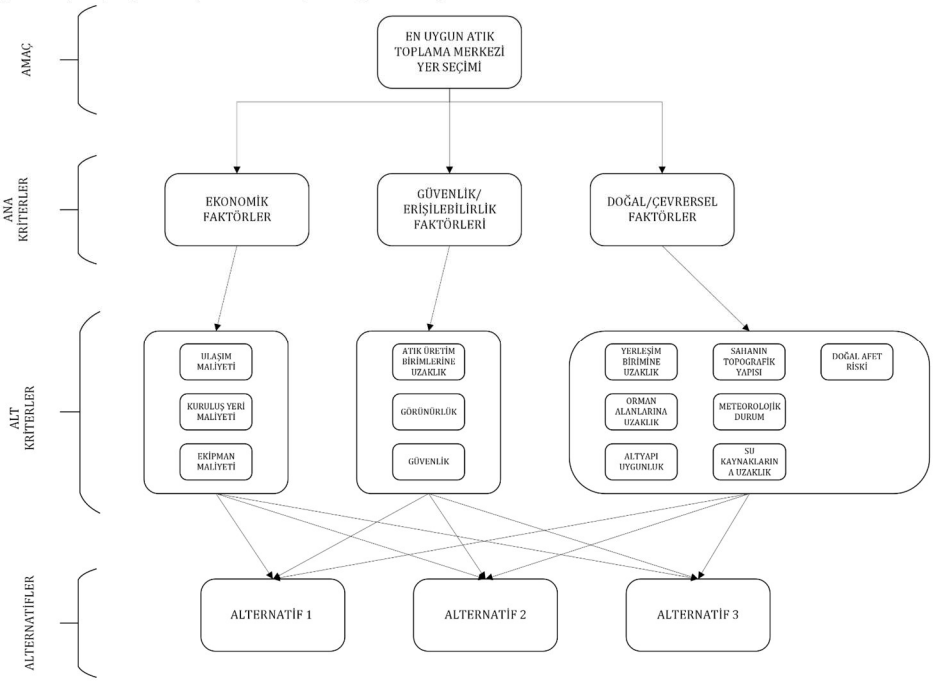
Atık depolama alanının yer seçimi için belirlenen kriterler, depolama alanının büyüklüğüne, kampüsün konumuna, alternatifler için belirlenen bölgelere, literatüre ve resmi olarak yayınlanan gerekliliklere göre seçilmiştir. Kriterler belirlenirken resmî gazetede yayımlanan 'Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik'te [17] geçen düzenli depolama koşulları göz önüne alınmıştır. İlgili Yönetmelik'te, bir depolama tesisi kurulmadan önce dikkate alınması gereken faktörler arasında, tesisin havadan ulaşım güvenliğine etkisi, özellikle koruma altına alınmış alanlara olan uzaklığı, ormanlık ve ağaçlandırılmış bölgeler, yaban hayatı ve bitki örtüsü gibi özel alanların korunması önemlidir. Ayrıca, yeraltı ve yüzeysel su kaynaklarının durumu ile koruma havzaları da göz önünde bulundurulmalıdır. Topografik, jeolojik, jeomorfolojik ve hidrojeolojik koşulların yanı sıra, taşkın, heyelan, çığ, erozyon ve deprem gibi riskler, hâkim rüzgâr yönü ve yağış rejimi gibi iklimsel faktörler de değerlendirilmelidir. Ayrıca, doğal ve kültürel mirasın durumu da dikkate alınmalıdır [17]. Bu çerçevede ana kriterler, doğal/çevresel faktörler, ekonomik faktörler ve güvenlik/erişilebilirlik faktörleri olarak belirlenmiştir.

B. Alt Kriterlerin Belirlenmesi

Ana kriterlerin belirlenmesinden sonra, her bir ana kriterin alt kriterleri oluşturulmuştur. Doğal/çevresel faktörlerinin (K1) alt kriterleri; altyapı uygunluk (K11), doğal afet riski (K12), meteorolojik durum (K13), orman alanlarına uzaklık (K14), sahanın topografik yapısı (K15), su kaynaklarına uzaklık (K16) ve yerleşim birimine uzaklıktır (K17). *Altyapı Uygunluk (K11)* kriteri, Yönetmelik'te yer alan "Sahada akaryakıt, gaz ve içme-kullanma suyu naklinde kullanılan boru hatları, yüksek gerilim hatları bulunmaz." maddesine göre belirlenen kriterdir [8,13,16]. *Doğal Afet Riski (K12)*, Düzce'nin coğrafi konumu ve tarihsel afet geçmişi dikkate alınarak değerlendirilmesi gereken bir kriterdir [7,8,10,15]. Hâkim rüzgâr yönü ve yağış durumu *Meteorolojik Durum (K13)* ile değerlendirilen bir kriterdir [6,7,10]. Yönetmelik, "Orman alanları, ağaçlandırma alanları, yaban hayatı ve bitki örtüsünün korunması gibi özel amaçlarla koruma altına alınmış alana uzaklığı" maddesine göre *Orman Alanlarına Uzaklık (K14)* kriteri belirlenmiştir [10]. Yönetmelik'teki "Sahanın topografik, jeolojik, jeomorfolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik durumu" maddesine göre ise *Sahanın Topografik Yapısı (K15)* kriteri belirlenmiştir [7,12]. *Su Kaynaklarına Uzaklık (K16)*, Yönetmelik'te yer alan "Bölgede bulunan yeraltı ve yüzeysel su kaynakları ve koruma havzalarının durumu, yeraltı su seviyesi ve yeraltı suyu akış yönleri" maddesine göre belirlenmiş olan kriterdir [10]. *Yerleşim Birimine Uzaklık (K17),* Yönetmelik'e konu edinilen "Düzenli depolama tesis sınırlarının yerleşim birimlerine uzaklığı I. sınıf düzenli depolama tesisleri için en az bir kilometre, II. sınıf ve III. sınıf düzenli depolama tesisleri için ise en az iki yüz elli metre olmak zorundadır" maddesine göre belirlenen bir kriterdir [10].

Ekonomik faktörlerin (K2) alt kriterleri; kuruluş yeri maliyeti, ulaşım maliyeti, ekipman maliyetidir. *Kuruluş Yeri Maliyeti (K21)* kriteri, atık toplama merkezinin kurulacağı bölgedeki genel kuruluş maliyetlerini içermektedir [9,13,14,16]. Toplanan atıkların merkeze taşınması için gerekli olan lojistik sürecin maliyetini içermesi açısından *Ulaşım Maliyeti (K22)* kriteri belirlenmiştir [10,15,16]. Atık toplama merkezinin işlevlerini yerine getirmek için gerekli olan ekipmanların alım, kurulum, bakım ve işletme maliyetlerini kapsayan kriter ise *Ekipman Maliyeti (K23)* kriteridir.

Güvenlik/erişilebilirlik faktörlerinin (K3) alt kriterleri; atık üretim birimlerine uzaklığı, görünürlük, güvenliktir. Binalardan çıkan atıkların, atık toplama merkezine olan uzaklığının etkisi *Atık Üretim Birimlerine Uzaklık (K31)* kriteri ile değerlendirilmiştir [8,10]. Çevresel uyum ve estetik bir görünüm sağlaması açısından *Görünürlük (K32)* kriteri ilave edilmiştir. Atık toplama tesisi içi ve çevresindeki güvenliği sağlamak incelenmesi gereken bir diğer kriter *Güvenlik (K33)*'tir [9,12]. Belirlenen ana ve alt kriterlerle hiyerarşik yapı oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. Hiyerarşik Yapı

C. İkili Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması

Hiyerarşik yapı kurulduktan sonra, ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. Karar vericilerden alınan değerlerin geometrik ortalamaları alınarak matrisler oluşturulmuştur. Ana kriterlerin ikili karşılaştırması Tablo 4'te sunulmaktadır. Matristeki her eleman kendi sütun toplamına bölünerek matris normalize edilmiştir (Tablo 5). Normalize edilmiş matrisin satırlarının toplamı, matrisin boyutuna bölünerek ortalama değeri elde edimiştir. Elde edilen değer kriterlerin önem ağırlığıdır (Tablo 6). Bu çerçevede, atık depolama alanının belirlenmesinde en önemli kriterler doğal/çevresel faktörler (0,3799) ve güvenlik-erişilebilirlik faktörleri (0,3756) olduğu belirlenmiştir. Denklem 5 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu ana kriterler için CR değeri 0,0740 bulunmuş olup, 0,10'dan küçük olması sebebiyle, cevapların tutarlı olduğu kanaatine varılmıştır [9].

Tablo 4. Ana Kriterlerin Karşılaştırma Tablosu

	K1	K2	K3
K1	1,0000	2,0726	0,7666
K2	0,4825	1,0000	0,8511
K3	1,3045	1,1749	1,0000

Tablo 5. Ana Kriterler için Normalize Edilmiş Matris Tablosu

	K1	K2	K3
K1	0,3588	0,4879	0,2928
K2	0,1731	0,2354	0,3251
K3	0,4681	0,2766	0,3820

Tablo 6. Ana Kriterlerin Önem Ağırlıkları

Ana Kriterler	Kriter Ağırlıkları
K1	0,3799
K2	0,2446
K3	0,3756

Ana kriterlerin önem ağırlıkları bulunduktan sonra, alt kriterlerin önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Alt kriterlerin önem ağırlıkları bulunurken aynı adımlar tekrar edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Alt Kriterlerin Küresel Ağırlıkları Hesabı Tablosu

Ana Kriterler	Kriter Ağırlıkları	Alt Kriterler	Alt Kriterlerin Kriter Ağırlıkları	Alt Kriterlerin Küresel Ağırlıkları
K1	0,3799	K11	0,1635	0,0621
		K12	0,1327	0,0504
		K13	0,0905	0,0344
		K14	0,0878	0,0334
		K15	0,1232	0,0468
		K16	0,2781	0,1057
		K17	0,1241	0,0472
K2	0,2446	K21	0,2987	0,0731
		K22	0,4030	0,0986
		K23	0,2982	0,0729
K3	0,3756	K31	0,2854	0,1072
		K32	0,1595	0,0599
		K33	0,5551	0,2085

D. Alternatiflerin Karşılaştırılması

Matrisin oluşturulmasından sonra, üç alternatifin alt kriterlere göre ikili karşılaştırılması yapılmıştır. Bu aşamada, alternatif 1 - A1, alternatif 2 - A2 ve alternatif 3 - A3 olarak gösterilmiştir. Alternatiflerin kıyaslandığı K21 alt kriteri (kuruluş yeri maliyeti) için örnek karşılaştırma Tablo 8'de, normalize edilmiş matris Tablo 9'da verilmektedir. Tablo 9'da verilen karşılaştırmaya dair CR değeri 0,000049 olarak

bulunmuş olup, 0,1'den düşük olduğu için sonuç tutarlı olarak değerlendirilmektedir. Alternatiflerin önem ağırlıkları değerlendirildiğinde (Tablo 10) K21 alt kriterine göre en uygun atık toplama merkezi yerinin, 0,5401 ağırlığı ile A2 olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8. Alternatiflerin K21 Alt Kriterine Göre İkili Karşılaştırma Tablosu

Alternatifler	A1	A2	A3
A1	1,0000	0,4221	0,6218
A2	2,3692	1,0000	1,5066
A3	1,6083	0,6637	1,0000

Tablo 9. Alternatiflerin K21 Alt Kriteri İçin Normalize Edilmiş Matris Tablosu

Alternatifler	A1	A2	A3
A1	0,2009	0,2024	0,1988
A2	0,4760	0,4794	0,4816
A3	0,3231	0,3182	0,3197

Tablo 10. K21 Alt Kriterine Göre Alternatiflerin Önem Ağırlıkları Tablosu

Alternatifler	Kriter Ağırlıkları
A1	0,3282
A2	0,5401
A3	0,1317

E. En uygun atık depolama alanı seçimi

İkili karşılaştırma, normalizasyon ve önem ağırlıklarının hesaplanmasında takip edilen tüm adımlar, alt kriterlerin ve alternatiflerin hepsi için tekrarlanmış olup, ana kriterlerin, alt kriterlerin ve alt kriterler için alternatiflerin önem ağırlıkları Tablo 11'de sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ana kriterlerin önem ağırlıkları sırasıyla K1, K3, K2 olmuştur. Alt kriterlerin önem ağırlıkları en yüksekten düşüğe doğru K33, K31, K16, K22, K21, K23, K11, K32, K12, K17, K15, K13, K14'tür. En önemli ana kriter K1 (doğal/çevresel faktörler) ve en önemli alt kriter K33 (güvenlik)'tür.

Alternatiflerin önem ağırlıkları A1 için 0,3181, A2 için 0,3795 ve A3 için 0,3024 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, Düzce Üniversitesi Konuralp kampüs içi atık toplama merkezi yer seçimi için AHP yöntemi ile yapılan hesaplamalar sonucunda en uygun alternatif 'A2' olmuştur.

Tablo 11. Sonuç Tablosu

Ana Kriterler	Kriter Ağırlıkları	Alt Kriterler	Alt Kriterlerin Kriter Ağırlıkları	Alt Kriterlerin Küresel Ağırlıkları	Alt Kriter İçin Alternatiflerin Önem Ağırlıkları	
K1	0,3799	K11	0,1635	0,0621	A1	0,0239
					A2	0,0301
					A3	0,0081
		K12	0,1327	0,0504	A1	0,0133
					A2	0,0241
					A3	0,0130
		K13	0,0905	0,0344	A1	0,0138
					A2	0,0091
					A3	0,0115
		K14	0,0878	0,0334	A1	0,0138
					A2	0,0090
					A3	0,0105
		K15	0,1232	0,0468	A1	0,0171
					A2	0,0217
					A3	0,0079
		K16	0,2781	0,1057	A1	0,0606
					A2	0,0251
					A3	0,0200

		K17	0,1241	0,0472	A1	0,0175
					A2	0,0183
					A3	0,0113
K2	0,2446	K21	0,2987	0,0731	A1	0,0147
					A2	0,0350
					A3	0,0234
		K22	0,4030	0,0986	A1	0,0287
					A2	0,0223
					A3	0,0476
		K23	0,2982	0,0729	A1	0,0207
					A2	0,0257
					A3	0,0265
K3	0,3756	K31	0,2854	0,1072	A1	0,0249
					A2	0,0367
					A3	0,0456
		K32	0,1595	0,0599	A1	0,0197
					A2	0,0324
					A3	0,0079
		K33	0,5551	0,2085	A1	0,0495
					A2	0,0899
					A3	0,0690

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmanın sonuçları Düzce Üniversitesi Konuralp kampüsü içinde atık toplama merkezi yer seçimi için önemli bir kılavuz sağlamaktadır. Belirlenen ana kriterler ve alt kriterler yer seçimi sürecinde dikkate alınacak önemli faktörleri temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan bir ÇKKV yöntemi olan AHP, yer seçimi problemlerine uygulanabilirliği ve başarısı kanıtlanmış bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar AHP'nin yer seçimi sürecinde etkili bir araç olduğunu ve çeşitli sektörlerde başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Mersinli, H. (2021) tarafından yapılan çalışmada 4 ana ve 31 alt kriter incelenerek Bursa ili için en uygun entegre katı atık tesisi yer seçimi işlemi yapılmıştır [10]. Çalışmada, CBS ve AHP yöntemi kullanılarak kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiş olup, ilgili yönetmelikte yer alan kriterlerin yetersiz olduğundan bahsedilmiştir. Çalışma kapsamında güvenlik kriterinin en önemli alt kriter olarak belirlenmesi, atık toplama merkezinin çevresi ve içi açısından güvenliğinin vurgulanması gerektiğini göstermektedir. En önemli ana kriter olarak doğal/çevresel faktörlerin önceliğinin olması ise atık toplama merkezinin çevresel etkilerinin ve ekosistemlerle uyumunun önemini ortaya koymaktadır. Düzce Üniversitesi alternatif atık depolama alanlarının karşılaştırılması sonucunda, doğal/çevresel faktörler ile güvenlik kriterlerinin A2 seçeneğinde en iyi şekilde karşılandığını belirlenmiştir. Bu sonuçlar atık toplama merkezi yer seçimi sürecinde karar vericilere rehberlik etmek için değerli bir kaynak oluşturmaktadır. Gelecekteki araştırmalarda farklı sıralama yöntemlerinin kullanılması ve daha geniş bir veri setinin incelenmesi ile daha kapsamlı ve daha net sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olacak unsurlardır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada Düzce Üniversitesi kampüs içi atık toplama merkezi yer seçimi için AHP yöntemini kullanılmıştır. Bu çalışma, atık toplama merkezi yer seçiminde birçok kriterin dikkate alınıp, birlikte değerlendirmesi gerektiğini göstermektedir. Yer seçimi yapılırken, ÇKKV yönteminde AHP'nin etkinliğine dikkat çekilmiştir. AHP yönteminin kullanılmasıyla yer seçimi karar verme süreci yapılandırılmış ve daha sistematik hale getirilmiştir. Çalışma, gelecekte yapılacak olan araştırmalarda farklı üniversiteler ve bölgelerde benzer analizlerin yapılmasını ve AHP'nin atık yönetimi uygulamalarında kullanım yöntemini içermektedir. Bu çalışmanın sonuçları atık yönetimi ve atık toplama merkezi yer seçimi konusunda diğer yerleşkeler için değerli bir kaynak olabilecek niteliktedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada karar verici olarak katkı sunan Düzce Üniversitesi akademik ve idari personellerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Kocaeli Büyükşehir Belediyesi & Kocaeli Akademik Odalar Birliği Kocaeli İlinde Yapılması Düşünülen Atık Bertaraf Tesisleri Yer Seçimi Raporu https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/At%C4%B1k%20Bertaraf%20Tesisi%20Yer%20Se%C3%A7imi%20Komisyonu%20Raporu.pdf

[2] https://sifiratik.gov.tr/

[3] Düzce İli 1/50.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planı'na Yönelik Stratejik Çevresel Değerlendirme İşi Taslak Kapsam Belirleme Raporu https://webdosya.csb.gov.tr/db/scd/icerikler/duzce-il--cdp-scd-taslak-kbr-20221020095936.pdf

[4] Özdoğan, B., & Civelekoğlu, G. (2019). Üniversite Yerleşkeleri İçin Ulusal Çevresel Sürdürülebilirlik Endeksinin Geliştirilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(1), 65-80.

[5] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia, 3(1), 77-87.

[6] Kara M., Ercan, Y., Yumuşak, R., Cürebal, A., Vd. (2022). Yenilenebilir Hibrit Enerji Santrali Uygulamasında Tesis Yer Seçimi. International Journal Of Engineering Research And Development, 14(1), 208-227.

[7] İnanç Barutçu Afet Durumunda İnsani Yardım Faaliyetlerinin Modellenmesi: Sahra Hastanesi İçin Ankara'da Yer Seçimi Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı 2021

[8] Ekin, E., & Okutkan, C. (2021). Promethee Yöntemi ile Tesis Yeri Seçim Problemine İlişkin Bir Uygulama. Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(1), 46-58

[9] Oral, N., Yumuşak, R., & Eren, T. (2021). Ahp ve Anp Yöntemleri Kullanılarak Tehlikeli Madde Depo Yeri Seçimi: Kırıkkale İlinde Bir Uygulama. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 115-124.

[10] Mersinli, H. (2021). Entegre katı atık yönetiminde analitik hiyerarşi prosesi ile coğrafi bilgi sistemi kullanarak düzenli depolama tesisi yer seçimi: Bursa örneği. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[11] Çiçekdağı, H. İ., & Kırış, Ş. (2012). Afet İstasyonu ve Toplanma Merkezi İçin Yer Seçimi ve Bir Uygulama. Journal Of Science And Technology Of Dumlupınar University (028), 67-76.

[12] Ömürgönülşen, M., & Menten, C. (2021). Bulanık Topsıs Yöntemi ile Ankara İli İçin Olası Afet Sonrası Geçici Barınma Alanlarının Seçimi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 7(1), 159-175.

[13] R. Baki, "Özel Bir Hastanenin Yer Seçimi İçin Bulanık Copras Tekniğinin Uygulanması", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 10, Sayı. 4, Ss. 1506-1514, Ara. 2021, Doi:10.17798/Bitlisfen.980813

[14] Türkmen, B. (2021). Lojistik köyü yer seçimi ve Türkiye'de örnek bir uygulama. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

[15] Demirci, A., & Arıkan, Ö. U. (2021). Covıd-19 Döneminde İlaç Deposu Yeri Seçimi: Mersin Örneği. Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 7(1), 5-27.

[16] Kabadayı, N., & Çakır Esen, T. E. (2021). Gri İlişkisel Temelli Topsıs Yöntemi ile Depo Yeri Seçimi. Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9(1), 169-184.

[17] Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik 26.03.2010 Resmi Gazete Sayısı:27533 (https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13887&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5)

[18] https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/105296/mod_resource/content/0/11.%C3%87ok%20%C3%96l%C3%A7%C3%BCtl%C3%BC%20Karar%20Verme%20Y%C3%B6ntemleri-III.pdf

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Farklı Proteolitik Enzimlerle Hidrolize Edilen Kazeinin Tulum Peyniri Üretiminde Kullanılması

Mehtap Çelik[a], Metin Yıldırım[b]*

[a]Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Çorum/Türkiye.
[b]Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Niğde/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** mehtapcelik@hitit.edu.tr

ÖZET

Beyaz ve Kaşar peynirlerinden sonra Türkiye'de en fazla üretilen ve tüketilen Tulum peynirinin, kendine özgü nitelikleri kazanabilmesi için en az 3 ay olgunlaştırılması gerekmektedir. Olgunlaştırma aşamasındaki iklimlendirme, işçilik ve diğer işletme masraflarını düşürmek ve kısıtlı üretim alanından en yüksek seviyede yararlanmak için peynirin olgunlaşma süresinin kısaltılması üretici açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, *Bacillus licheniformis* kaynaklı endoproteaz ve *Aspergillus oryzae* kaynaklı endoproteaz/ekzoproteaz enzimleriyle %10 seviyesinde hidrolize edilen kazein ilavesinin Tulum peynirinin bazı nitelikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kuru maddesinin %10'u oranında hidrolize edilmiş ve/veya edilmemiş kazein içeren 6 çeşit peynir üretilip 90 gün boyunca 6±1°C olgunlaştırılmıştır. Örneklerin titrasyon asitliği (% laktik asit) %0,73-1,43, pH 4,21-4,80, kuru madde %47,71-51,83, yağ %21,71-25,34, tuz %2,43-3,61, protein %20,06-25,77, suda çözünen protein %2,50-8,25, toplam serbest yağ asitleri (% oleik asit) %0,66-0,99, laktik asit %1,11-2,36 ve sitrik asit düzeylerinin 1168-2700 ppm arasında değiştiği saptanmıştır. De Man-Rogosa-Sharpe agarda laktik asit bakteri sayısı 6,28-8,69 log kob/g aralığında bulunmuştur. Sonuç olarak, Tulum peynirinin olgunlaşma süresini kısaltmak için %10 seviyesinde hidrolize edilen kazeinlerin kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Tulum peyniri, hidrolize kazein, fizikokimyasal nitelikler, hızlı olgunlaştırma, endoproteaz, ekzoproteaz.*

Use of The Casein Hydrolyzed with Different Proteolytic Enzymes in Tulum Cheese Making

Mehtap Çelik[a], Metin Yıldırım[b]*

[a]Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Corum/Turkey.
[b]Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Nigde/Turkey.
* **Corresponding Author:** mehtapcelik@hitit.edu.tr

ABSTRACT

Tulum cheese, which is the most produced and consumed cheese in Turkey after White and Kashar cheeses, needs to be ripened for at least 3 months in order to gain its unique properties. Shortening the ripening period of cheese is of great importance for the producer in order to reduce air conditioning, labor and other operating expenses during the ripening process and to increase cheese production in the limited production area. In this study, the effect of the addition of casein hydrolyzed to 10% hydrolysis degree by endoprotease from *Bacillus licheniformis* and endoprotease/exoprotease mixture from *Aspergillus oryzae*, on some properties of Tulum cheese was investigated. For this purpose, 6 types of cheese containing 10% hydrolyzed and/or non-hydrolyzed casein in the dry matter were produced and matured for 90 days at 6±1°C. The titratable acidity (as % lactic acid), pH, dry matter, protein, fat, salt, water-soluble protein, total free fatty acids (as % oleic acid), lactic and citric acid level of Tulum cheese were found to vary between 0.73-1.43%, 4.21-4.80,47.71-51.83%, 21.71-25.34%, 2.43-3.61%, 20.06-25.77%, 2.50-8.25%, 0.66-0.99%, 1.11- 2.36% and 1168-2700 ppm, respectively. The number of lactic acid bacteria on De Man-Rogosa-Sharpe agar was found to be of 6.28-8.69 log cfu/g. As a result, it has been determined that 10% hydrolyzed casein can be used to shorten the ripening time of Tulum cheese.

Keywords: *Tulum cheese, casein hydrolysis, physicochemical properties, accelerated ripening, endoprotease, exoprotease.*

I. GİRİŞ

Ülkemizde en fazla üretilen üçüncü peynir çeşidi olan Tulum peyniri ([1], [2]) Türk gıda kodeksi' ne göre "Hammaddenin peynir mayası kullanılarak pıhtılaştırılması ile elde edilen telemenin fermantasyonunu takiben ufalanıp tuzlanması, daha sonra gıdaya temasa uygun bir ambalaj malzemesine veya deri tulumlara sıkıca basılarak üretilen ve olgunlaştırıldıktan sonra piyasaya arz edilen çeşidine özgü karakteristik özellikler gösteren peynir" biçiminde tanımlanmaktadır [3].

Üretildikleri bölgelere göre isimlendirilen Tulum peynirleri Anamur, Divle, Kargı, İzmir, Erzincan (Şavak) ve Çimi gibi isimlerle anılmaktadır [1]. Soğuk ortamlarda ve %75-85 bağıl neme sahip ortamlarda olgunlaşmaya bırakılan Tulum peynirinin olgunlaşması 90-210 gün kadar sürmektedir ([1], [4]-[7]). Her peynir çeşidinin kendine özgü nitelikleri kazanması için gerekli olan fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve enzimatik değişikliklerin, belirli koşullar ve belirli bir zamanda gerçekleşmesine olgunlaşma denmektedir [8]. Peynirde olgunlaşma, glikoliz, lipoliz ve proteoliz olmak üzere üç biyokimyasal tepkimeden oluşmaktadır ([9], [10]). En önemli ve karmaşık biyokimyasal tepkime olan proteoliz, her peynir çeşidine özgü lezzet ve dokunun meydana gelmesinde etkili olan peptitlerin ve serbest amino asitlerin üretimini sağlamaktadır [11].

Peynir olgunlaşması tam olarak kontrol edilemeyen, uzun ve maliyeti yüksek bir süreçtir. Peynirin kontrollü şartlarda, kısa sürede olgunlaşmasını sağlamak için enzim esaslı iki yöntem üzerinde durulmuştur. Bu yöntemlerin birinde olgunlaşma odası sıcaklığının yükseltilmesi; diğerinde ise saflaştırılmış enzim ve/veya enzim üretme kapasitesi değiştirilmiş bakteriler kullanılarak peynirdeki mevcut enzimatik aktivitenin arttırılması amaçlanmıştır [12]. Olgunlaştırma sıcaklığının yükseltilmesiyle birlikte, mikrobiyal olarak bozulma riskinin arttığı ve istenmeyen reaksiyonların oluştuğu bildirilmiştir [13]. İkinci yöntem olan hücre ekstraktlarının, enzimlerin ya da kapsüllenmiş enzimlerin süte veya telemeye ilave edilmesi durumunda ise aşırı proteoliz ve lipoliz sonucunda peynir veriminin azaldığı tespit edilmiştir ([14]-[17]). Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için yapılan çalışmada, önceden hidrolize edilen kazein, Tulum peyniri telemesine ilave edilmiş ve olgunlaşma süresinin kısaldığını belirlenmiştir [18].

Önceki çalışmalar doğrultusunda, peynir sütüne veya telemeye enzim eklenmesine oranla telemeye hidrolize kazein ilavesinin, olgunlaşmanın daha kolay kontrol edilebilmesine ve daha kısa sürede gerçekleşmesine yardımcı olabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca mikroorganizma gelişimini teşvik edebileceğinden, hidrolize kazein ilavesi olgunlaşmanın daha kısa sürede gerçekleşmesine dolaylı bir şekilde de katkı sağlayabilecektir. Bu nedenle kazeinin endoproteaz (Alkaline Protease®) ve endoproteaz/ekzoproteaz (Fungal Protease®) enzimleri ile hidrolizi sonucunda elde edilen hidrolizatların Tulum peynirinin bazı nitelikleri ve olgunlaşma hızı üzerindeki potansiyel etkilerinin araştırılması bu çalışmanın temel hedefini oluşturmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Çalışmada kullanılan süt, Çorum ilindeki bir fabrikadan ve Alkaline Protease (endoproteaz) ve Fungal Protease (endo/ekzoproteaz) ticari isimli enzimler Bio-Cat (Troy, VA, Amerika Birleşik Devletleri) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kimyasallar Merck ve Tekkim Kimya Sanayi Ltd. Şti.' den, peynir paketlemesinde kullanılan sentetik sucuk kılıfları ise yerel bir baharatçıdan alınmıştır.

Kazein üretimi [19]'a ve kazeinin hidrolizasyonu ise [20]'ye göre gerçekleştirilmiştir. Peynir üretiminde, pastörize edilen süt mayalama sıcaklığına kadar soğutulup %1,5 starter kültür ilave edilmiştir, Kültür ilavesinden 30 dakika sonra %0,02 oranında $CaCl_2$ ilave edilip 15 dakika beklenmiş ve 90 dakika sonra pıhtı kesim olgunluğuna erişecek şekilde maya ilavesi gerçekleştirilmiştir. Pıhtılaşma gerçekleştikten sonra, pıhtı kesilmiş, 180 dakika baskısız ve 12 saat baskılı süzme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen teleme nohut büyüklüğünde parçalanarak tuzlama işlemi gerçekleştirilmiş ve hidrolize ve hidrolize edilmemiş kazein, altı gruba bölünen peynire aşağıdaki şekilde (Tablo 1.) ilave edilmiştir.

Olgunlaşmanın 1, 15, 30, 60 ve 90. günlerinde pH analizi [21]'e, titrasyon asitliği (% laktik asit eşdeğeri olarak) [22]'ye, kuru madde analizi [23]'e, yağ analizi [24]'e, tuz analizi [25]'e, protein ve suda çözünür protein analizi [26]'ya, sodyum dodesil sülfat poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE) [27]'ye, toplam serbest yağ asitleri (% oleik asit eşdeğeri olarak) [28]'e, organik asitler (laktik asit, asetik asit, sitrik asit ve bütirik asit) [29]'a, laktik asit bakteri sayımı [30]'a, duyusal değerlendirme [31] ve [32]'ye göre ve istatistiksel analiz SPSS programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Hidrolize olmuş veya olmamış kazein ilavesiyle üretilen peynir grupları

Peynir örneği	Bileşenler (Kuru maddenin yüzdesi olarak)		
	Kazein (K)	Endoproteaz ile hidrolize edilen kazein (EK)	Endoproteaz/ ekzoproteaz karışımı ile hidrolize edilen kazein (EEK)
K	10	-	-
EK	-	10	-
EEK	-	-	10
K+EK	5	5	-
K+EEK	5	-	5
EK+EEK	-	5	5

K: Kuru maddesinin %10'u oranında kazein katkılı peynir örneği
EK: Kuru maddesinin %10'u oranında endoproteaz ile hidrolize edilen kazein katkılı peynir örneği
EEK: Kuru maddesinin %10'u oranında endo/ekzoproteaz karışımı ile hidrolize edilen kazein katkılı peynir örneği
K+EK: Kuru maddesinin %5'i oranında kazein + %5'i oranında endoproteaz ile hidrolize edilen kazein katkılı peynir örneği
K+EEK: Kuru maddesinin %5'i oranında kazein + %5'i oranında endo/ekzoproteaz ile hidrolize edilen kazein katkılı peynir örneği
EK+EEK: Kuru maddesinin %5'i oranında endoproteaz ile hidrolize edilen kazein + %5'i oranında endo/ekzoproteaz ile hidrolize edilen kazein katkılı peynir örneği

III. SONUÇLAR

Peynir örneklerinin pH değerleri 4,21-4,80 arasında değişim sergilemiştir. Enzimlerle hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin ve depolama zamanının pH değerleri üzerinde önemsiz bir etki gösterdiği saptanmıştır (P>0,05). Tulum peynirlerinin titrasyon asitliği değerleri %0,73-1,43 aralığında değişim göstermiştir. Hidrolize edilmemiş kazein eklenen peynir örneğinin (K) hidrolize kazein ilave edilen peynir örneklerine göre daha düşük titrasyon asitliği değerine sahip olduğu belirlenmiştir (P≤0,05). Bu sonucun hidrolize edilmemiş kazein ilave edilen örneğin istatistiksel olarak önemli olmamakla birlikte daha az laktik asit bakterisi içermesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Deneme peynirlerinin kuru madde oranlarının %47,71-51,83 arasında değiştiği; hem hidrolize kazein ilavesinin hem de olgunlaşma sürelerinin kuru madde oranları üzerinde önemsiz bir etki gösterdiği saptanmıştır (P>0,05). Türk Gıda Kodeksi Peynir Tebliği'nde, Tulum peynirinin en az %55 kuru madde içeriğine sahip olması gerektiği ifade edilmiş olmasına rağmen deneme peynirlerinin tamamı söz konusu değerin altında bir kuru madde oranına sahip olmuştur.

Tulum peyniri örneklerinin yağ oranlarının %21,71-25,34 aralığında değiştiği; hem hidrolize kazein eklenmesinin hem de olgunlaşma sürelerinin yağ oranları üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (P>0,05). Peynir örnekleri nem alış-verişine engel olacak şekilde ambalajlandığından peynir örneklerinin yağ oranları da kuru madde oranları gibi olgunlaşma süresince belirgin bir farklılık sergilememiştir. Örneklerin kuru maddede yağ oranlarının %42,50-50,89 arasında değiştiği, bu nedenle Türk Gıda Kodeksi Peynir Tebliği açısından tam yağlı peynir sınıfında yer aldıkları saptanmıştır.

Peynirlerin tuz oranları %2,43-3,61 aralığında değişim göstermiştir. Örneklerin tuz oranlarına hidrolize kazein eklenmesinin etkisinin önemsiz (P>0,05); olgunlaşma zamanının etkisinin ise önemli olduğu saptanmıştır (P≤0,05). Kuru maddede tuz oranları %4,69-7,52 arasında değişim göstermiştir. Türk Gıda Kodeksi Peynir Tebliği'ne göre en fazla %5 olması gereken kuru maddede tuz sınırının deneme peynirlerinde genel olarak aşıldığı saptanmıştır.

Peynir örneklerinin protein oranlarının %20,06-25,77 arasında değiştiği saptanmıştır. Örneklerin protein oranları üzerine enzimle hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin etkisi önemli (P≤0,05); depolama zamanının etkisi ise önemsiz bulunmuştur (P>0,05).

Deneme peynirlerinin suda (pH 4,40'ta) çözünen protein oranlarının %2,50-8,25 arasında değiştiği saptanmıştır. Suda (pH 4,40'ta) çözünen protein oranları üzerine hem hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin hem olgunlaşma süresinin hem de bu iki faktörün ortak etkisi önemli bulunmuştur (P≤0,05). K örneğinin 90. günde gösterdiği suda çözünen protein düzeyine (%3,78), EK (%4,89), EEK (%4,88) ve EK+EEK (%4,78) örneklerinin daha ilk günde, K+EEK (%4,02) ve K+EEK (%4,07) örneklerinin ise 30. günde sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tulum peynirlerinin olgunlaşma katsayılarının %9,70-34,88 aralığında değiştiği; olgunlaşma katsayılarına hem hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin hem de depolama zamanının etkisinin önemli olduğu saptanmıştır (P≤0,05). Olgunlaşma katsayısı değerleri dikkate alındığında, hidrolize kazein ilavesinin olgunlaşmanın birinci gününden itibaren olgunluk derecesini dikkate değer bir şekilde arttırdığı saptanmıştır.

Sodyum dodesil sülfat poliakrilamid jel elektroforezi analizi sonucunda, olgunlaşmanın ilerlemesine paralel olarak bütün peynir gruplarında kazein fraksiyonlarının parçalandığı görülmüştür. Sadece kazein ilavesiyle hazırlanan K örneğinde kazein fraksiyonlarının parçalanmasının diğer peynir gruplarına oranla daha yavaş gerçekleştiği; en yüksek kazein hidrolizinin EK+EEK peynirinde gerçekleştiği saptanmıştır.

Peynir örneklerinde toplam serbest yağ asitleri oranı (%oleik asit eşdeğeri olarak) %0,66-0,99 arasında bulunmuştur. Örneklerin toplam serbest yağ asitleri oranları üzerine, hidrolize kazein eklenmesinin etkisinin önemsiz ($P>0,05$); olgunlaşma zamanının etkisinin ise önemli olduğu saptanmıştır ($P\leq0,05$). Olgunlaşma döneminin ilerlemesiyle birlikte peynir örneklerinin toplam serbest yağ asitleri içeriklerinde önemli düzeyde azalma gözlenmiştir ($P\leq0,05$). Bu azalmanın, serbest yağ asitlerinin β-oksidasyonu ile parçalanarak farklı ürünlere dönüşmesinden ve/veya laktik asit bakterileri tarafından kullanılmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Tulum peyniri örneklerinde laktik asit düzeyinin %1,11-2,36 değerleri arasında değiştiği; laktik asit içeriklerine hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin etkisinin önemsiz ($P>0,05$); depolama zamanının etkisinin ise önemli olduğu belirlenmiştir ($P\leq0,05$). Olgunlaşma boyunca deneme örneklerinin laktik asit düzeyleri artış ve azalışlar şeklinde düzensiz bir değişim sergilemiştir.

Asetik asit analizinde kullanılan HPLC yöntemi ile peynir örneklerinde ölçülebilir düzeyde asetik asit tespit edilememiştir. Deneme peynirleri sitrik asit içeriklerinin 1168-2700 ppm arasında değiştiği saptanmıştır. Örneklerin sitrik asit miktarlarına hem hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin hem de olgunlaşma zamanının etkisinin önemsiz olduğu saptanmıştır ($P>0,05$). Olgunlaşmanın yalnızca başlangıç (1. gün) ve bitiş (90. gün) dönemlerindeki sitrik asit miktarları karşılaştırıldığında, K örneği hariç diğer bütün örneklerde sitrik asit miktarlarının artış gösterdiği saptanmıştır. Bu artış, Krebs döngüsünde gerçekleşen sitrik asit üretimine bağlanmıştır.

Çalışmada kullanılan HPLC yöntemi ile peynir örneklerinde ölçülebilir düzeyde bütirik asit tespit edilememiştir. Sütte Clostridium sporlarının bulunmaması veya çok az sayıda bulunması ya da sporların çimlenmek için uygun bir ortam bulamaması böyle bir sonuca yol açmış olabilir. Ayrıca peynir örneklerinde lipolizin düşük seviyelerde olması da böyle bir sonuca katkı sağlamış olabilir.

Tulum peyniri örneklerinin laktik asit bakterisi sayısının 6,28-8,69 log kob/g arasında değiştiği; laktik asit bakterisi sayılarına hidrolize edilmiş kazein eklenmesinin etkisinin önemsiz ($P>0,05$); depolama zamanının etkisinin ise önemli olduğu belirlenmiştir ($P\leq0,05$). Olgunlaşma süresince peynir örneklerindeki laktik asit bakteri sayısının önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır ($P\leq0,05$). Hidrolize kazein ilave edilmeyen K örneğine oranla hidrolize kazein ilave edilen örneklerde 60. güne kadar, özellikle de 15. günde daha bariz olmak üzere laktik asit bakterilerinin gelişiminin teşvik edildiği görülmüştür.

Tulum peynirlerinin kabul edilebilirlik puanları (7 üzerinden) 3,90-5,70 aralığında değişim göstermiştir. Örneklerin kabul edilebilirlik-beğeni puanları üzerine, hidrolize kazein eklenmesinin etkisinin önemli ($P\leq0,05$); olgunlaşma zamanının etkisinin ise önemsiz olduğu belirlenmiştir ($P>0,05$). Hidrolize kazein içermeyen K örneği ile K+EEK örneğinin en çok beğenilen örnekler olduğu saptanmıştır.

TS-3001 Tulum Peyniri Standardında yer alan duyusal değerlendirme testi sonucunda peynir örneklerinin kesit ve görünüş puanları (25 üzerinden) 18,75-24,00; yapı puanları (25 üzerinden) 11,00-20,50; koku puanları (25 üzerinden) 16,50-24,00 ve tat puanları (25 üzerinden) 11,25-20,75 arasında değişmiştir. Her bir örneğe ait toplam puan (100 üzerinden) ise 66,5-81,00 arasında değişim göstermiştir. Peynir örnekleri en yüksek kesit ve görünüş, yapı, koku ve tat puanlarına depolamanın 30. gününde ulaştığı için 30 günlük bir olgunlaşmanın yeterli olduğu öngörülmüştür. Ayrıca panelistler tarafından hidrolize kazein eklenen örnekler hakkında herhangi bir olumsuz yorum da yapılmamıştır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmanın sonucunda daha hızlı olgunlaşan Tulum peyniri elde etmek için Bacillus licheniformis kaynaklı endoproteaz ve Aspergillus oryzae kaynaklı endoproteaz/ekzoproteaz karışımı enzimler ile %10 düzeyinde hidrolizasyona uğratılan kazeinin kullanılabileceği saptanmıştır. Hidrolize kazein içermeyen K örneği kadar beğenilen K+EEK örneğinin diğer peynir örneklerinin önüne geçtiği görülmüştür. Duyusal analiz sonucunda 30 günlük olgunlaşma süresinin tüm peynir çeşitleri için yeterli olabileceği değerlendirilmiştir.

Hidrolize kazein kullanılarak olgunlaşmanın hızlandırılması konusunda somut gelişmeler sağlanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda farklı özgünlükteki proteazlarla hidrolize edilmiş kazeinlerin ve/veya lipolitik enzimlerle muamele edilen süt ürünlerinin kullanım olanaklarının araştırılmasının hem süt bilimi hem de süt endüstrisi bakımından faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca farklı proteolitik enzimlerin aktivitesiyle elde edilen hidrolizatların ilavesiyle üretilen Tulum peynirlerinde oluşabilecek biyoaktif peptitler ve özelliklerinin araştırılması da yararlı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TGT 2019/BAGEP numaralı "Farklı Proteolitik Enzimlerle Hidrolize Edilen Kazeinin Tulum Peyniri Üretiminde Kullanılması" isimli BAP projesinden üretilmiş olup projeye destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

[1] Durlu-Özkaya, F., and Gün, İ., "Anadolu'da Peynir Kültürü", *ICANAS 38. Uluslararası Asya ve Kuzey Afrika Çalışmaları Kongresi*, Ankara, s 485-507, 10-15 Eylül, 2007.

[2] Arslaner, A. and Türkmen, Ö., "Erzincan Tulum Cheese", *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(4), 932-940, 2020.

[3] TGK, Türk Gıda Kodeksi, Peynir Tebliği, Tebliğ No: 2015/6, 2015.

[4] Eralp, M., Peynir Teknolojisi. *Ankara Üniversitesi Yayınları*, Ankara, 1974.

[5] Tekinşen, O. C., Nizamlıoğlu, M., Keleş, A., Atasever, M. and Güner, A., "Tulum peyniri üretiminde yarı sentetik kılıfların kullanılabilme imkanları ve vakum ambalajlamanın kaliteye etkisi", *Vet. Bil. Derg.*, 14(2), 63-70, 1998.

[6] Cakmakci, S., Gurses, M. and Gundogdu, E., "The effect of different packaging materials on proteolysis, sensory scores and gross composition of Tulum cheese", *African Journal of Biotechnology*, 10(21), 4444-4449, 2011.

[7] Üçüncü, M., "A' dan Z' ye Peynir Teknolojisi, Cilt II" , *Sidas*, pp. 905-915, 2020.

[8] Fox, P. F. and McSweeney, P. L. H., "Proteolysis in cheese during ripening", *Food Reviews International*, 12(4), 457-509, 1996.

[9] McSweeney, P. L. and Sousa, M. J., "Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review", *Le Lait*, 80(3), 293-324, 2000.

[10] Azarnia, S., Lee, B. H., St-Gelais, D., Champagne, C. P. and Kilcawley, K. N., "Effect of free or encapsulated recombinant aminopeptitase of Lactobacillus rhamnosus S93 on acceleration of cheddar cheese ripening", *Food Biotechnology*, 24(2), 135-149, 2010.

[11] McSweeney, P. L., "Biochemistry of cheese ripening", *International journal of dairy technology*, 57(2-3), 127-144, 2004.

[12] Calasso, M., Mancini, L., Di Cagno, R., Cardinali, G. and Gobbetti, M., "Microbial cellfree extracts as sources of enzyme activities to be used for enhancement flavor development of ewe milk cheese", *J. Dairy Sci.*, 98 (9), 5874-5889, 2015.

[13] Folkertsma, B., Fox, P. F. and McSweeney, P. L. H. "Accelerated ripening of Cheddar cheese at elevated temperatures", *Int. Dairy Journal*,6, 1117-1134, 1996.

[14] Fox, P.F., Cheese: Chemistry, Physics and Mıcrobiology Volume 1, *Springer-Science+Business Media*, B.V., 1993.

[15] Law, B. A., "Controlled and accelerated cheese ripening: the research base for new technology", *International Dairy Journal*, 11(4-7), 383-398, 2001.

[16] Azarnia, S., Robert, N. and Lee, B.H., "Biotechnological methods to accelerate Cheddar cheese ripening", *Crit. Rev. Biotechnol.*, 26(3), 121-143, 2006.

[17] Karaca, O. B., Mikrobiyel Kaynaklı Proteolitik ve Lipolitik Enzim Kullanımının Beyaz Peynirlerin Özellikleri ve Olgunlaşmaları Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 174, 2007.

[18] Varol, S., Kazein hidrolizatının Tulum peynirinde kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 23-33, 2019.

[19] Gürsel, A., Süt esaslı ürünler teknolojisi, *Ankara Ünv. Ziraat Fak. Yayınları*, 1522, 2001.

[20] Adler-Nissen, J., Enzymic hydrolysis of food proteins, *Elsevier Applied Science Publishers*, New York, USA, 132–142, 1986.

[21] BS 770, Part 5. Determination of pH Value, British Standard Method for Chemical Analysis of Cheese, *British Standards Institution*, UK, 1976.

[22] Anonim, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, (16th. ed.), Gaithersburg, Maryland, USA, 1997.

[23] TS 12145, *Türk Standartları Enstitüsü*, Kurutma kütle kayıbına dayalı gravimetrik metot, Ankara, 1998.

[24] TS 3046, Peynirde Yağ Miktarı Tayini (Van Gulik Metodu) Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1978.

[25] TS-591, Beyaz Peyniri Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.

[26] Waterborg, J.H., The Lowry method for protein quantitation., The Protein Protocols Handbook:, *Springer*, 2009.

[27] Laemmli, U. K., "Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4", *Nature*, 227(5259), 680-685, 1970.

[28] Nunez, M., Garcıa-Aser, C., Rodrıguez-Martın, M. A., Medına, M. and Gaya, P., "The effect of ripening and cooking temperatures on proteolysis and lipolysis in Manchego Cheese", *Food Chemistry*, 21, 115-123, 1986.

[29] Bouzas, J., Kantt, C. A., Bodyfelt, F. and Torres, J. A., "Simultaneous determination of sugars and organic acids in Cheddar Cheese by high-performance liquid chromatography", *Journal of Food Science*, 56(1), 276-278, 1991.

[30] ISO 15214, Microbiology of food and animal feeding stuffs - Horizontal method for the enumeration of mesophilic lactic acid bacteria - Colony-count technique at 30°C, *International Standardisation Organisation*, 1998.

[31] Meilgaard, M., Civille, G.V. and Carr, B.T., "Sensory Evaluation Techniques", 3rd Edition, *CRC Press*, New York, USA, 1999.

[32] TS-3001, *Türk Standartları Enstitüsü*, Tulum Peyniri, Ankara, 2006.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Arduino Nano ile Akıllı Tekerlekli Sandalye Sistemi

Rıdvan Yayla[a], Murat Bektaş[b]*

[a]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilecik/Türkiye.
[b]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilecik/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** ridvan.yayla@bilecik.edu.tr

ÖZET

Günümüzde engelli bireyler yaşamın her alanında zorluklarla mücadele etmektedirler. Bilişsel teknolojinin gelişmesiyle, engelli bireyleri yaşama ümidiyle birleştiren uygulamalar bu zorlukları aşmaya yardımcı olmaktadır. Farklı uzuvlarını doğuştan ya da sonradan kaybeden bireyler için, kaybedilen vücut bölgesi ile ilgili işaret dilinden, akıllı protezlere, akıllı gözlüklerden sesli asistanlara kadar çeşitli uygulamalar halen geliştirilmektedir. Aynı zamanda giyilebilir teknolojilerin geliştirilmesi ile engelsiz bireylerin bile hayatını kolaylaştıran uygulamalar mevcuttur. Özellikle yürüme engeli bulunan bireyler için, cadde rampaları, motorlu veya elektrikli sandalyeler, merdiven sistemleri gibi farklı uygulamalara gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmada Arduino Nano ile yürüme engeli olan bireylerin ellerinin üstüne giyilebilir teknolojiye uygun bir aparat takarak, tekerlekli sandalyeyi istedikleri yöne hareket ettirebilecekleri prototip bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulama, çok farklı yönlere hareket ettirilebilen sandalye sistemi sayesinde engelli bireyin sandalyeyi bilek hareketleri ile diledikleri yöne kolaylıkla hareket ettirebilmelerini sağlamaktadır. Çalışmanın gelecek çalışmalarda bir kol yardımıyla hareket ettirilen iş makinesi, oyun konsolları ve farklı giyilebilir teknolojiler için kol yerine bilek hareketleri ile kontrol edilmesine yardımcı olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arduino nano, Engelsiz hayat, Giyilebilir teknoloji, Tekerlekli sandalye

Smart Wheelchair System with Arduino Nano

ABSTRACT

Today, disabled individuals struggle with challenges in every field of life. The applications which combine disabled individuals with life hope help to overcome these challenges by the development of cognitive technology. Various applications related to the lost body field from sign language to smart prostheses, from smart glasses to voice assistants are still being developed for individuals who have lost different limbs, either congenitally or later. At the same time, there are a lot of applications that are made easy in their life even non-disabled individuals with the development of wearable technology. The different applications such as street ramps, motorized or electrical chairs, and stair systems are required for especially walking disabled individuals. In this study, a prototype application was developed with Arduino Nano, where individuals with walking disabilities can move the wheelchair in the direction they want by attaching a wearable technology-appropriate device on their hands. Thanks to the chair system that can be moved in many different directions, the application allows disabled individuals to easily move the chair in any direction they wish with wrist movements. It is predicted that the study will help control work machines, game consoles and different wearable technologies that are moved with the help of an arm, with wrist movements instead of arm, in future studies.

Keywords: *Arduino Nano, Barrier-free life, Wearable technology, Wheelchair,*

I. GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütüne (WHO) göre engellilik kavramı "kişiden ya da bir bütün olarak vücuttan beklenilen davranışlar, yetenekler ve görevler olarak ifade edilen normal aktivitelerin yerine getirilmesindeki eksiklik ya da sınırlılık" olarak tanımlanmaktadır [1]. 2005 yılında resmi gazetede yayımlanan 5378 sayılı engelliler hakkında kanunun c bendinde ise engelli birey " Fiziksel, zihinsel, ruhsal ve duyusal yetilerinde çeşitli düzeyde kayıplarından dolayı topluma diğer bireyler ile birlikte eşit koşullarda tam ve etkin katılımını kısıtlayan tutum ve çevre koşullarında etkilenen birey" olarak tanımlanmaktadır [2]. Dünya Sağlık Örgütüne göre 59 ülke genelinde 18 yaş ve üzeri yetişkin nüfus arasında engelliliğin ortalama yaygınlık oranı %15.6 iken Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2022 verilerine göre Türkiye'de nüfusun %12.8'i engelli bireylerden oluşmaktadır [3][4].

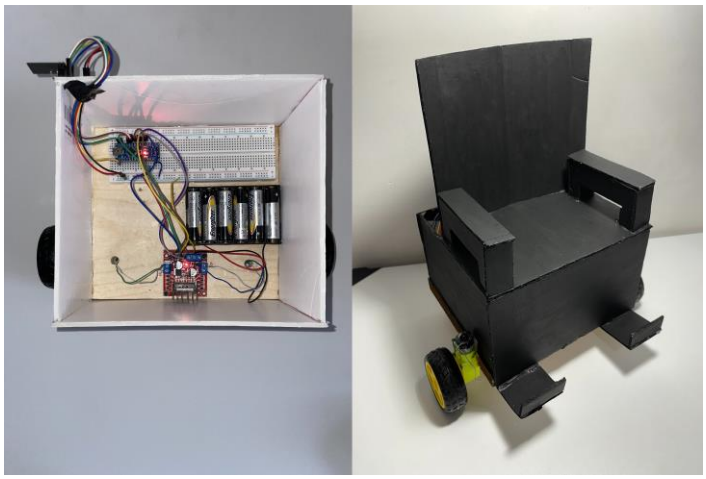
Engellilere yönelik Sosyal model ile birlikte tıbbi model de ihmal edilmiş, sosyolojik ve çevresel yönleri de tartışmalara neden olmuştur. Tıbbi modelin argümanı olan "tıbbi müdahaleler" ile sosyal modelin argümanı olan ""sosyal ve toplumsal bütünlük" bir arada kullanılmıştır. Engelliliği ele alan kuramsal yaklaşımların zamanla bütüncül ve insani bir anlayış kazandığını söylemek mümkündür [5]. Bu açıdan bakıldığında engelli bireylere sağlanan teknolojik medikal materyaller; kişinin temel yaşamsal faaliyetlerinin yanı sıra psikososyal ihtiyaçları gözetilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Engelli nüfusun içerisinde en fazla yürüme engellilerin olduğunu ve bu insanların hem çevrelerinde hem de konut gibi yerlerde hareket alanının oldukça sınırlı olduğu, yetersiz kaldığını belirtilmektedir [6]. Her ne kadar yürüme engeli yaşayan bireylerin hayatını kolaylaştırmaya yönelik teknolojik çalışmalar yapılsa da bu çalışmalar işlevsellik ve en az çaba ilkesi paralelinde geliştirilmesi gerekmektedir.

Tekerlekli sandalye, yürüme engeli olan bireylerin ulaşımını kolaylaştıran temel bir icattır. Bu bireyler, her türlü ulaşımı tekerlekli sandalye üzerinden sağlamaktadır. Ayrıca şehir merkezlerinde, toplu taşımada ve toplu etkinlik mekânlarında yürüme engelli bireyler için, akıllı merdivenler, yürüme rampaları ve asansörler gibi sandalyenin geçişini sağlayacak çeşitli geçiş teknikleri de geliştirilmiştir. Referans [7] tekerlekli sandalye kullanıcılarının hayatlarını kolaylaştıracak bir çalışma masası tasarımı yapmıştır [7]. Referans [8] cami iç mekânlarında tekerlekli sandalye uyumlu bir abdest alma ünitesi önermiştir [8]. Referans [9] çalışmasında SLEGS robot olarak bilinen tekerlek teknolojisi, Fusion 360 programı ile yürüme engelli bir araç tasarlamıştır [9]. Bu gelişmelere ek olarak, Türkiye'de MS hastaları için kafa hareketleri ile hareket edebilen bir tekerlekli sandalye geliştirilmiştir [10]. Referans [11] el ve ayaklarını kullanamayan yürüme engelli bireyler için kafa hareketleri ile kontrol edebilen bir akıllı sandalye sistemi geliştirmiştir [11]. Bir başka çalışmada benzer şekilde [12], yine kafa hareketleri ile kontrol edilebilen yarı-otonom elektrikli sandalye sistemi tasarlamıştır [12]. Ancak el ve ayaklarını kontrol edemeyen bireyler için bu tasarımlar uygun olsa da, el engeli bulunmayan bireyler için insan bedeninde el ve bilek bölgesi, kontrol mekanizması olarak en uygun olan noktadır. Çalışmamızda ise, el üstüne takılan bir mekanizma ile bilek hareketleri ile hareket ettirilebilen akıllı bir tekerlekli sandalye prototipi geliştirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

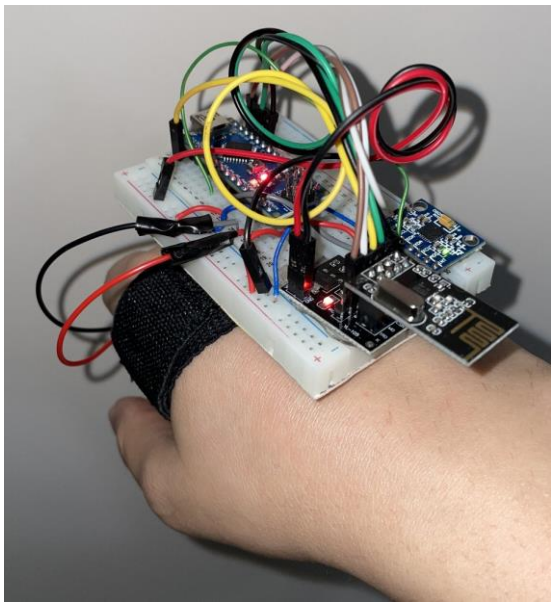
Akıllı sandalyeler, engelli bireylerin hareket kabiliyetin arttıran en önemli iletişim aracıdır. Bu araçlar, engelli bireyin psikososyal gelişimini ve toplumda engelsiz bir birey olduğunu hissetmesi için en az çaba ile hareket ettirilmesi gerekmektedir. Günümüzde el ile hareket ettirilen tekerlekli sandalyelere ek olarak, motorlu ve bir el konsolu yardımıyla hareketi sağlayan tekerlekli sandalyeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin geliştirilmesi, yürüme engelli bireylerin yaşamlarını daha kolay sürdürebilmesi için hayati önem taşımaktadır.



Şekil. 1 Prototip çalışmanın iç ve dış tasarımı

Çalışmada, yürüme engelli bireyin bilek hareketlerinden yararlanarak tekerlekli sandalyeyi hareket ettirebilmesini sağlayan akıllı bir sistem geliştirilmiştir. Bu prototip çalışmada Arduino Nano, NRF24L01 kablosuz iletişim modülü, MPU6050 jiroskop modülü, L298N DC Motor devresi kullanılmış ve prototip bir akıllı sandalye modeli oluşturularak devre tamamlanmıştır. Prototip çalışmanın iç ve dış tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.

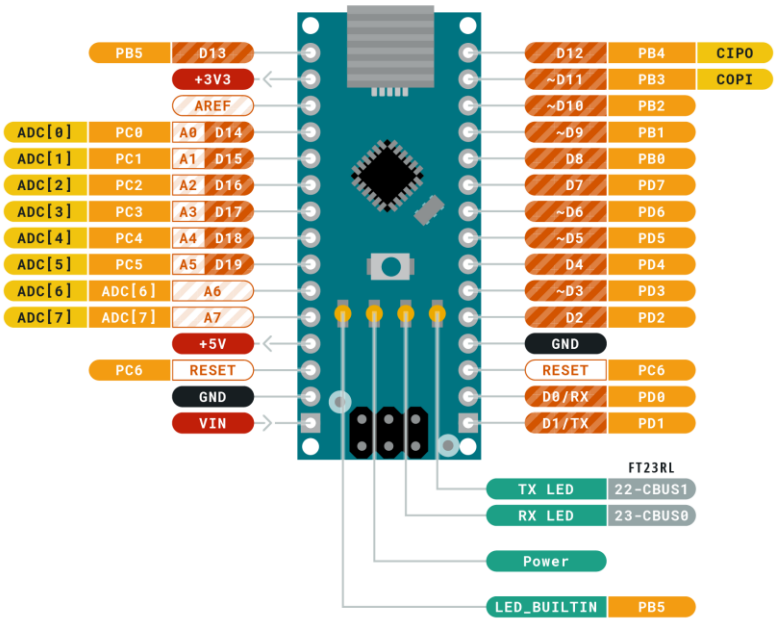
Akıllı tekerlekli sandalyede iki adet donanım bulunmaktadır. İlk donanım bireyin el üstüne takılarak verici görevini gören donanım, ikincisi sandalyenin hareket etmesini sağlayan alıcı donanımdır. Tekerlekli sandalyenin hareket etmesini sağlayan verici el donanımı ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Alıcı ve verici arasındaki iletişimi sağlayarak tekerlekli sandalyenin hareketini sağlayan donanımlar sırasıyla A, B, C ve D bölümlerinde, çalışma prensibi ise E bölümünde açıklanmıştır.



Şekil. 2 Verici donanımı

A. *Arduino Nano*

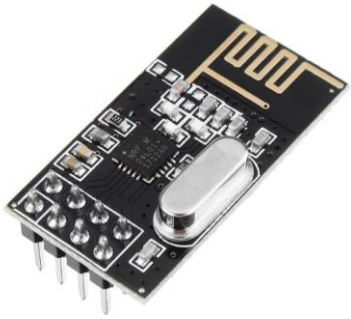
Arduino Nano, donanımsal bir girdiyi okuyup, bir çıkışa dönüştürebilen Arduino kartlarının en küçük boyutunda hızlı prototipler oluşturmak için özel olarak tasarlanmış bir geliştirme kartıdır. Kartın çekirdeğinde, 16 MHz frekansta çalışan ve Arduino Duemilanove ile benzer işlevlere sahip olan ATmega328 mikrodenetleyici bulunmaktadır. Kart, 20 dijital giriş/çıkış pini, 8 analog pin ve bir mini-USB portu ile donatılmıştır [13]. Bu projede kullanılan Arduino Nano kartının pin yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil. 3 Arduino Nano ve pin yapısı [14].

B. Kablosuz İletişim Modülü

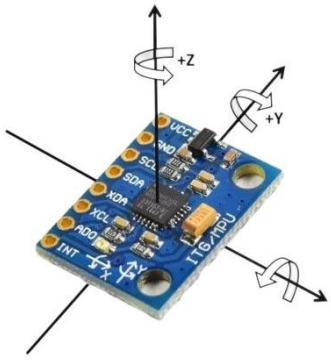
Çalışmada, verici el donanımından elde edilen yön bilgisini tekerlekli sandalyenin doğru yönde hareket etmesini sağlamak için NRF24L01 kablosuz iletişim modülü kullanılmıştır. NRF24L01, 2.4 Ghz frekans bandında çalışan, düşük güç tüketimi, düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle birçok kablosuz iletişim uygulamasında tercih edilmektedir [15].Kablosuz sensör ağları ile tümleşik olarak çalışan hava kalitesinin belirlenmesi, uzak mesafelerin gözlemlenmesi, uzaktan kumanda sistemleri gibi çok çeşitli uygulamalar için bu iletişim modülü düşük güç tüketimi ile sıklıkla kullanılır. Modülün doğru bir şekilde yapılandırılması ve programlanması sağlıklı bir kablosuz iletişim açısından hayati önem taşır. NRF24L01 modülü SPI (Serilan Peripheral Interface) aracılığıyla kolay bir şekilde programlanabilmektedir. NRF24L01 kablosuz iletişim modülü Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil. 4 NRF24L01 kablosuz iletişim modülü [15].

C. Eksen İvme Ölçme Modülü

MPU6050, üç eksen üzerinde ivme ölçen bir modüldür. Bu özellik, sensörün hareket ve eğilme gibi değişikliklerini ölçmeyi sağlar. Üç eksenli jiroskop özelliği sayesinde sensörün dönme ve açısal hız değişikliklerini algılamaya olanak tanır. Hava araçları, robotlar, oyun kumandaları, giyilebilir teknoloji ve diğer hareketli sistemlerde konum takibi için de kullanılabilir. 3.3V veya 5V ile çalışabilen MPU6050 modülü, , üç eksenli ivmeölçer ve üç akslı jireskop özelliği ile, I2C ve SPI gibi haberleşme protokollerini de desteklemektedir [16]. MPU6050 ivme ölçme modülü Şekil 5'te gösterilmiştir.

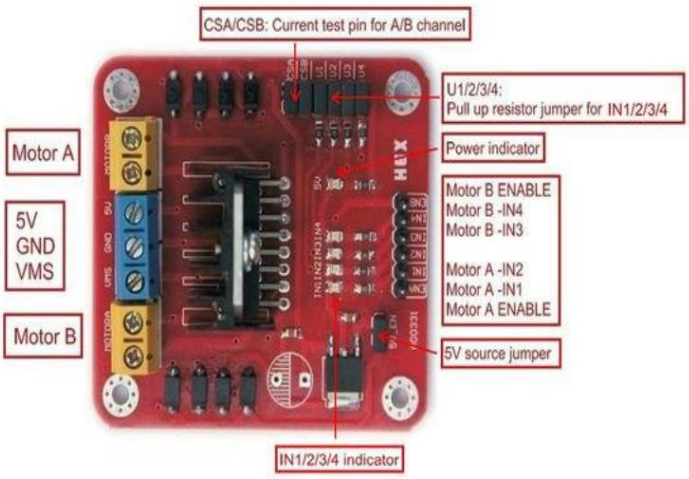


Şekil. 5 MPU6050 İvme ölçme modülü [17].

D. Motor Sürücü Devresi

L298N, DC motorları veya step motorları kontrol etmek için birçok projede kullanılan motor sürücü entegre devresidir. Bu entegre devre; genellikle mikrodenetleyiciler, Arduino, Raspberry Pi gibi düşük seviyeli kontrol sistemleriyle entegre edilerek kullanılır. Şekil 6'da gösterilen L298N, tekerlekli sandalyenin tekerleğine bağlı motorların dönme yönünü kontrol etme, motor hızını ayarlama ve motor sürücüsüne bağlı birçok diğer işlevleri gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Çift H köprü tasarımı sayesinde motorun her iki yöne de dönmesini sağlar. L298N, iki kanallı olup kanal başına 2 amper akım vermektedir. Bu akım, çeşitli boyutlardaki DC motorları veya step motorları kontrol etmek için yeterli gücü sağlar. Genellikle 7 ila 35 volt arasında bir voltaj aralığında çalışmaktadır. Mikrodenetleyiciler veya diğer kontrol cihazlarından gelen düşük seviyeli lojik sinyalleri algılayabilmesi, L298N'nin kolayca diğer dijital cihazlarla entegre

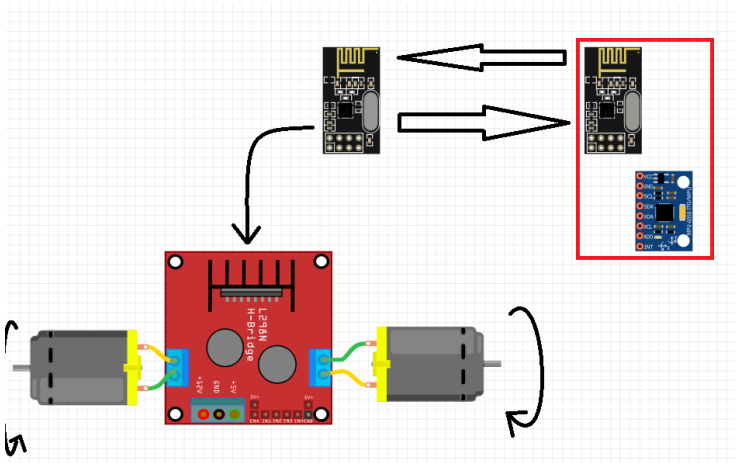
edilebilmesini sağlamaktadır [17]. L298N; Robotik projelerde çeşitli motor tipleri, DC motorları veya step motorlarını kontrol etmek için otomasyon uygulamalarında ve Arduino veya Rasperry Pi tabanlı araç kontrol sistemlerinde sıkça kullanır.



Şekil. 6 L298N Motor Sürücü Devresi [17].

E. Çalışma Prensibi

Akıllı tekerlekli sandalye prototipinde el üzerinde bulunan verici donanımı ile sandalyenin hareket etmesini sağlayan alıcı donanımı olmak üzere iki adet ekipman bulunmaktadır. Vericideki wifi modülü alıcıdaki wifi modülü ile bağlantı kurarak veri iletişimini sağlamaktadır. Vericide bulunan MPU6050 modülü sandalyenin hareket yönünü belirler.

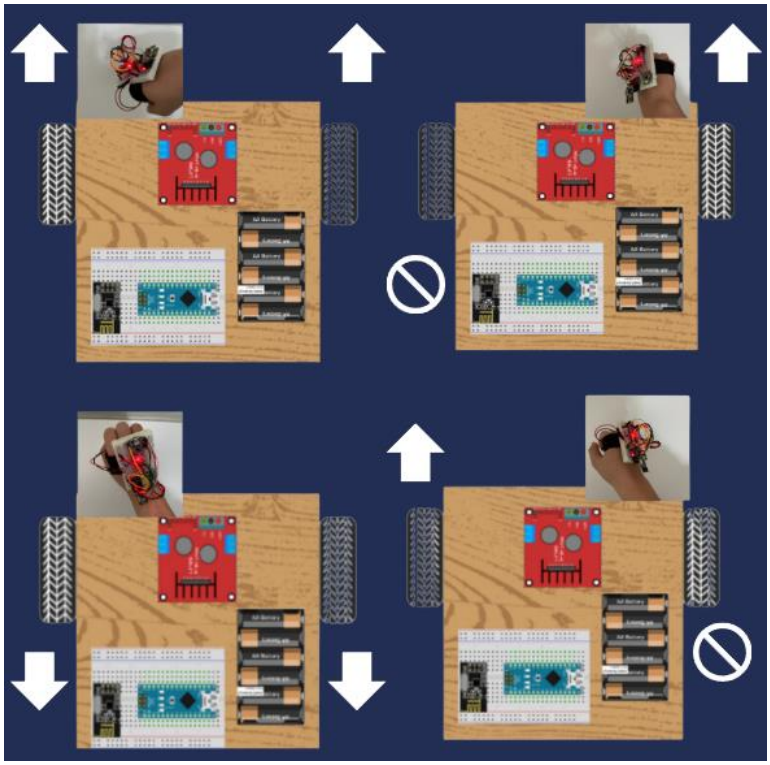


Şekil. 7 Akıllı Tekerlekli Sandalyenin Çalışma Prensibi

Kullanıcı bileğini öne eğince sandalye ileri, bileğini arkaya eğdiğinde ise geri yönlü hareket etmektedir. Bileği sağa ve sola eğince sandalye bileğin eğildiği yön paralelinde dönmektedir. PU6050 modülü bu eğimleri algılar ve NRF24L01 wifi modülü sayesinde bu eğimleri alıcı tarafına gönderir. Alıcı tarafında bulunan L298N motor sürücüsü de bu eğimler doğrultusunda tekerlere bağlı motorları harekete geçirir. Projenin çalışma prensibi şekil 7'de, bilek pozisyonlarına göre hareketi ise Şekil 8'te gösterilmiştir. Verici, ivmeölçerden gelen verileri NRF24L01 wifi modülü ile alıcıda bulunan NRF24L01 wifi modülüne gönderir ve L298N motor sürücüsü, motorları çalıştırarak tekerlerin dönmesini sağlar .

Prototipin içerisinde alıcı rolünü sağlamak üzere bir Arduino Nano yerleştirilmiş, L298N sandalyede motorlara yakın olabilmesi adına en ön kısma konumlandırılmıştır. Wifi modülü olan NRF24L01 ise daha sağlıklı iletişim kurulabilmesi adına sandalyenin dış kısmına konumlandırılmıştır. Donanımı çalıştırmak ve donanımlar arası iletişimi sağlamak için 6 adet standart mignon pil kullanılmıştır. Sandalye prototipinin alt

kısmında iki adet motorlu, bir adet rulmanlı olmak üzere üç adet teker kullanılmıştır. İç kısımda bulunan ekipmanların daha sağlıklı bir biçimde yerleştirilebilmesi adına prototipin alt kısmı için tahta kullanılmış, diğer kısımlar için ise maket kartonu kullanılmıştır. Bilek hareketleri sayesinde prototip akıllı sandalye sistemi istenilen yöne doğru hareket ettirilebilmektedir. Bu prototip çalışma yürüme engelli bireyin, sandalyeyi daha rahat bir şekilde hareket ettirebilmesi ve ergonomik olarak sandalyenin fonksiyonel çalışmasına imkan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil. 8 Bilek pozisyonlarına göre sandalyenin hareketleri

III. SONUÇLAR

Yürüme engeli, bireyin günlük yaşamını etkileyen ve çeşitli nedenlere bağlı olarak ortaya çıkabilen bir durumdur. Bu engel, genellikle fiziksel, nörolojik veya genetik faktörlere dayanabilir. Yürüme engeli olan bireyler, çeşitli zorluklarla karşılaşabilirler, ancak bu durum, hayatlarını tam ve aktif bir şekilde sürdürmelerine engel olmamalıdır. Ayrıca, yürüme engeli olan bireylerin günlük yaşamlarını sürdürmelerine yardımcı olacak teknolojik gelişmelerin desteklenmesi öncelikli bir alandır. Hareketi kolaylaştıran teknolojik araçlar ve günlük yaşamı kolaylaştıran çeşitli araçlar, bu bireylerin bağımsızlıklarını artırabilir. Bu bağlamda, bu çalışmada engelli bireyin, engel durumunu en aza indirgeyecek olan ve giyilebilir teknoloji ile desteklenmiş olan akıllı tekerlekli sandalye prototipi geliştirilmiştir. Çalışmada engelli bireyin elinin üzerine takılan giyilebilir bir aparat ile bilek hareketlerine bağlı bir prototip çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sayede engelli bireyin sandalyeye tam kontrolü amaçlanmış, bireyin sandalyeyi ergonomik bir şekilde hareket ettirilmesi sağlanmıştır.

IV. TARTIŞMA

Bilekte bulunan verici sayesinde kullanıcı bileğini hareket ettirerek sandalyenin hangi yöne hareket edeceğini alıcıya iletmektedir. Bu prototip sistemin parçaları gerçek bir sandalye sistemine entegre edilip güçlendirilerek eski tip arkadan itmeli sandalyeler de bilek hareketleri ile kontrol edilebilen tekerlekli sandalyelere dönüştürülebilir.

Bu çalışma manuel hareket ettirebilir akülü sandalyelerden farklı olarak daha ergonomik bir kullanım mantığıyla tasarlanmıştır. Çalışmanın önemi prototip sandalyenin bilek hareketleri aracılığıyla rahatlıkla döndürülmesini sağlamaktır. Prototip çalışmanın, çalışma prensibi sonraki aşamalarda disiplinlerarası bir çalışma yürütülerek akıllı tekerlekli sandalye tasarımcıları tarafından daha estetik bir görünüme kavuşturulabilir, diğer mühendislik disiplinleri tarafından ise enerji kaybı daha aza indirgenecek şekilde tasarlanabilir. Ayrıca acil durum anları için bir panik butonu eklenebilir. Aynı zamanda güvenlik açısından tekerlek miline bağlı motorun hız ayarlamaları yapılabilir. Bu sayede akıllı sandalyenin tam bir kontrol ile çalışması sağlanabilir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, yürüme engelli bireyler için tekerlekli sandalyenin daha ergonomik bir biçimde hareket ettirilmesi amacıyla prototip bir proje geliştirilmiştir. Akıllı tekerlekli sandalyenin çalışma prensibi incelendiğinde, çalışma prensibinin kolay, uygulanabilir ve ergonomik bir prototip çalışma olduğu öngörülmektedir. Bu sayede gerçek bir tekerlekli sandalyenin çalışma sistemine uygun olarak el üstüne yerleştirilecek ergonomik bir kontrol mekanizması tasarlanarak proje uygulanabilir. Ayrıca ileri çalışmalarda projenin genişletilerek farklı güvenlik sistemleri ile donatılması öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu proje, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümü lisans bitirme çalışması kapsamında oluşturulmuş olup, projeye katkı sağlayan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölüm başkanlığına teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR

[1] World Health Organization (WHO). (1976) WHO homepage on International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). [Online]. Available: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41003/9241541261_eng.pdf;jsession

[2] RG,1 Temmuz 2005 ve 5378/25868 sayılı kanun (Engelliler hakkında kanun)

[3] Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı, "Dünya Engellilik Raporu," Technical Report, World Health Organization (WHO) Press,Ankara, Türkiye, Jan. 2011.

[4] TÜİK İstatistik veri portalı, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2022.

[5] S. Orhan, and E. Özkan, "Engelli Kadın Olmak", Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22(1), 1-19, 2020.

[6] M. Altınok and M.M. Kars " Tekerlekli Sandalye Kullanan Engellilere Yönelik Islak Mekan Düzenlemelerinde Fonksiyonel Yaklaşımlar", Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, 021, 107-120, 2010.

[7] T. Dizel, K. Özkaya & A. Karami. "Tekerlekli Sandalye Kullanıcıları için Çalışma Masası Tasarımı". Ergonomi, 6(2), 109-116, 2023.

[8] A. Durukan & E. Önal, "Cami İç Mekânlarında Tekerlekli Sandalye Uyumlu Abdest Alma Ünite Önerisi", Cedrus, c. 10, 437–454, 2022.

[9] M. Polatlıgil. "SLEGS Robot Tabanlı Yürüme Engelli Aracı Tasarımı", Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri Ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi, 4(1). 42-51, 2020.

[10] (2016) Hürriyet Gazetesi haberi (Teyzesinin hastalığından etkilendi 'akıllı sandalye' geliştirdi). [Online]. Available: https://www.hurriyet.com.tr/kampus/teyzesinin-hastaligindan-etkilendi-akilli-sandalye-gelistirdi-40199129

[11] A.Süzen, Ö. Deniz & A. Çetin. "Kafa Hareketleri İle Kontrol Edilebilen Tekerlekli Sandalye", Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(Özel Sayı 1) ,66-72,2017.

[12] V. Sezer. "Kafa Hareketleriyle Kontrol Edilebilen Yarı-Otonom Elektrikli Sandalye Geliştirilmesi", Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6(1),221-232,2018.

[13] A. Shah. (2020) "Arduino — Beginning with Basics", Medium Blog Page [Online]. Available:https://medium.com/vicara-hardware-university/arduino-beginning-with-basics-438314847b5a

[14] Arduino Nano, "Product Reference Manual," Technical Report, Arduino Nano Documentation, GNU Licence, Jan. 2023.

[15] Nordic Semiconductor, "nRF24L01 Datasheet".Technical Report, Sparkfun, Mar. 2006.,

[16] InvenSense Inc, " MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.0", Technical Report,InvenSense, Sep. 2012.

[17] (2023) ElectronicCats github page. [Online]. Available: https://github.com/ElectronicCats/mpu6050

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Altı Farklı Makine Öğrenmesi Algoritması Kullanarak Akciğer Kanserinin Tahmin Edilmesi

Çiğdem Serdengeçti[a], Yaşar Barış Dolukan[a], Erkan Akkur[b]*

[a]OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, Ankara/Türkiye.
[b] Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu, Ankara/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** cigdem.serdengecti@ostimteknik.edu.tr

ÖZET

Akciğerlerde kontrolsüz hücre bölünmesi sonucu oluşan akciğer kanseri, dünya genelinde en sık görülen ölümcül hastalıklardan biridir. Son yıllarda gelişen teknolojinin sağlık alanında kullanımının artmasıyla kanser hastalığının erken evrelerde teşhisi mümkün hale gelmiştir. Özellikle yapay zeka teknolojisinin alt dalı olan makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde kanser hastalığı belirtilerinin sınıflandırılarak değerlendirilmesiyle teşhis konusunda oldukça memnun edici sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemiyle akciğer kanseri hastalığının erken evrede teşhisinin sağlanması amaçlanmıştır. Temel hedef; akciğer kanserini en yüksek sınıflandırma oranı ile tahmin edebilen makine öğrenme algoritmasının belirlenmesi ve böylelikle hastalığın hem erken teşhis edilebilmesi hem de bu teşhisin doğruluk oranının en yüksek seviyede olmasının sağlanmasıdır. Bu amaca yönelik altı farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Makine öğrenme algoritmalarının performanslarının sınanması amacıyla; veri ön işleme, sınıflandırma, tahmin ve görselleştirme için değişik kütüphanelerin kullanımına imkan sağlayan Phyton 3.7.2 platformu kullanılmıştır. Veri kümesi; eğitim ve test olmak üzere rastgele ikiye bölünmüştür. Veri kümesi sınıflarındaki dengesiz dağılım, Sentetik Azınlık Örnekleme tekniği ile giderilmiştir. Algoritmaların performanslarını değerlendirmek amacıyla sırasıyla doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve AUC parametreleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Akciğer kanseri, makine öğrenmesi.*

Prediction of Lung Cancer Using Six Different Machine Learning Algorithms

ABSTRACT

Lung cancer, which occurs as a result of uncontrolled cell growth and division in the lungs, is one of the most common fatal diseases worldwide. Recently, diagnosing cancer in the early stages has become possible under favour of innovative technologies developed on artificial intelligence. Satisfactory results are obtained in classifying and identifying the symptoms of cancer diseases by machine learning algorithms which is a subfield of artificial intelligence technology. In this study, we aimed to diagnose lung cancer at an early stage by machine learning method with six different machine algorithms. In order to test the performance of machine learning algorithms within the scope of the study; Phyton 3.7.2 platform, which allows the use of different libraries for data pre-processing, classification, prediction and visualization, was used. The dataset was randomly divided into training and testing. To balance the imbalanced dataset, SMOTE was utilized. Accuracy, precision, sensitivity, F1 score and AUC parameters were used to evaluate the performance of the algorithms respectively.

Keywords: *Lung cancer, machine learning*

I. GİRİŞ

Solunum sisteminin en önemli organı olan akciğerde bulunan hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalmaları sonucu oluşan kötü huylu tümörler, dünya genelinde diğer kanser türlerine göre ölüm oranı en yüksek hastalık olan akciğer kanserine neden olmaktadır [1]. İstatistiklere göre yılda yaklaşık 2,2 milyon kişiye akciğer kanseri teşhisi konulmakta ve bu kişilerin yaklaşık %75'i hayatını kaybetmektedir [2]. Akciğer kanserinin; genetik faktörler, hava kirliliği, endüstriyel ve çevresel atıklara maruz kalma gibi nedenleri bulunmakla birlikte en önemli etkenin tütün kullanımı olduğu bilinmektedir [3]. Yapılan çalışmalarda akciğer kanseri hastalarının %90'ının tütün kullandığı görülmüştür [4]. Nefes darlığı, geçmeyen öksürük, göğüs ağrısı, ateş, ses kısıklığı, ani ve hızlı ortaya çıkan kilo kaybı en sık görülen akciğer kanseri belirtileridir [5]. Akciğer kanserinin tanısında; toraks bilgisayarlı tomografi, göğüs röntgeni, MRI, PET/CT gibi çeşitli görüntüleme yöntemlerden faydalanılmaktadır [6]. Tüm kanser türlerinde olduğu gibi akciğer kanserinde de erken evrede tanı konulması hastanın yaşama şansının artması açısından önem arz etmekte fakat maalesef akciğer kanserinin erken evrelerinde belirgin spesifik semptomlara sahip olmaması sebebiyle genellikle ilerleyen evrelerde tespiti mümkün olmaktadır [7], [8].

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ile yapay zekanın alt dalı olan makine öğrenme algoritmaları sağlık hizmetlerinde, özellikle de hastalık teşhisinde önemli bir rol oynamaya başlamıştır [9]. Makine öğrenme algoritmaları, hastalardan elde edilmiş olan klinik verileri kendi veri tabanındaki bilgilerle yorumlayarak, bu veriler üzerinden elde ettiği bağlantılar sayesinde yeni durumlar hakkında tahminler yapma yeteneğine sahiptir. Dolayısıyla, bu algoritmalar mevcut olan veri tabanı üzerinden öğrenerek, yeni ve farklı durumlar için tahminler yürütmeye olanak sağlar [10]. Literatürde makine öğrenme algoritmaları kullanarak başta kanser türleri olmak üzere, diyabet, hepatit C, kronik böbrek hastalığı, COVID-19 gibi çok çeşitli hastalıkların tahmininde geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır [11] – [14]. Diğer hastalıkların tahmin edilmesinde olduğu gibi akciğer kanserinin tahmin edilmesinde de makine öğrenme algoritmalarının kullanılması başta erken teşhis olmak üzere pek çok avantaj sağlamaktadır [15], [16].

Bu çalışmada akciğer kanserinin tahmini amacıyla altı farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı akciğer kanserini en yüksek sınıflandırma oranı ile tahmin eden makine öğrenme algoritmasının araştırılmasıdır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada, veri bilimi üzerine gerçekleştirilen bilimsel araştırmalarda sıklıkla tercih edilen Kaggle [17] platformunda yer alan bir akciğer kanseri veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesi 309 örnekten ve kişilerin temel özelliklerinin yanı sıra zararlı alışkanlıkları ve sağlıkları konusunda gözlemlenebilen farklı anormalliklerin varlığına dair bilgileri içeren 15 farklı öznitelikten oluşmaktadır. Ayrıca, veri kümesinde çıkış özniteliği olarak kişilere akciğer kanseri tanısı konulup konulmadığına dair bir etiket bilgisi yer almaktadır. Veri kümesi içerisinde bulunan özniteliklere ait bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri kümesindeki öznitelikler

Öznitelik	**Tanım**
Cinsiyet	Kişinin erkek mi kadın mı olduğunu gösterir.
Yaş	Kişinin yaşı kaydedilir.
Sigara içmek	Sigara içip içmediğini gösterir.
Sarı parmaklar	Parmaklarının sarı olup olmadığını gösterir.
Kronik hastalık	Kronik bir hastalığı olup olmadığını gösterir.
Tükenmişlik	Katılımcının yorgunluk düzeyini belirtir.
Alerji	Kişinin alerjisi olup olmadığını gösterir.
Hırıltı	Bireyde hışıltı olup olmadığını ortaya çıkarır.
Alkol	Kişinin içki içip içmediğini gösterir.
Öksürme	Katılımcının öksürüğü olup olmadığını gösterir.
Nefes darlığı	Katılımcının nefes darlığı yaşayıp yaşamadığını gösterir.
Yutma zorluğu	Kullanıcının yutma sorunu yaşayıp yaşamadığını gösterir.
Göğüs ağrısı	Bireyin göğüs ağrısı yaşayıp yaşamadığını gösterir.
Akciğer kanseri	Bireye akciğer kanseri tanısı konup konulmadığını belirtir.

Veri kümesi analiz edildiğinde, herhangi bir eksik veya kayıp değere rastlanmamış fakat veri kümesindeki sınıf dağılımının dengesiz bir durumda olduğu görülmüştür. Katılımcıların %87.4'ü akciğer kanseri tanısına sahipken %13.7'si ise akciğer tanısına sahip değildir. Veri kümesindeki bu dengesiz sınıf dağılımı makine öğrenme algoritmalarının uygulanmasında dikkat edilmesi gereken bir konudur. Makine öğrenme algoritmaları genellikle eğitim veri kümelerinin dengeli olarak dağıldığını varsayarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirirler. Etiket bilgisi daha az olan örnekler sınıflandırma algoritmaları tarafından yeterince eğitilmediği için algoritmanın bu sınıf için hatalı tahminlerde bulunması oldukça yüksek olasılık dahilindedir. Bu nedenle makine öğrenme algoritmalarını kullanmadan önce dengesiz sınıf dağılımının dengeli bir duruma getirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada dengesiz sınıf dağılım problemini çözmek amacıyla Sentetik Azınlık Örnekleme tekniği (Synthetic Minority Oversampling Technique, SMOTE) kullanılmıştır. Bu teknik veri kümelerindeki örnek sayısını dengeli bir şekilde artırmak için kullanılan istatiksel bir tekniktir [18]. SMOTE tekniğinde veri kümesinde azınlık olan sınıf analiz edilerek sentetik veriler oluşturulur. Bir azınlık sınıf örneği ile en yakın komşusunun benzerliğine dayanan yeni bir gözlem oluşturulur. Aşırı örnekleme örneğinin miktarına bağlı olarak komşular, K-en yakın komşu (K-NN) algoritmasından faydalanılarak k-en yakın komşudan seçilmektedir. Bu durum azınlık sınıf örneklerine benzer gözlemlerin üretildiği anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, SMOTE tekniği kullanılarak veri kümesindeki sınıf dağılımı %50 olarak ayarlanmıştır. K-NN algoritmasındaki k değeri olarak da 5 değeri seçilmiştir. Tüm bu ayarlama ve düzenlemelerin sonucu olarak veri kümesindeki yeni sınıf dağılımında 270 adet akciğer kanseri tanısı örneği ve 270 adet akciğer kanseri tanısı olmayan örnek bulunmaktadır.

Veri kümesindeki cinsiyet dışındaki özniteliklerin hepsi Evet/Hayır şeklinde string olarak ifade edilmiştir. Veri kümelerindeki nitel verilerin makine öğrenme algoritmalarında kullanılabilmesi için sayısal değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak etiket kodlama tekniği kullanılarak veri kümesinde bulunan nitel veriler sayısal değerlere (0/1) dönüştürülmüştür. Bu çalışmada akciğer kanserinin tahmini amacıyla lojistik regresyon, rastgele orman, Naive Bayes sınıflandırıcısı, karar ağacı ve destek vektör makineleri ve K-NN olmak üzere altı farklı sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Kullanılan makine öğrenme algoritmalarının performanslarının sınanması, veri ön işleme, sınıflandırma, tahmin ve görselleştirme için farklı kütüphaneler sunan Phyton 3.7.2 platformundan faydalanılmıştır. Veri kümesi eğitim ve test olmak üzere 70:30 oranında rastgele olarak ikiye bölünmüş, sınıflandırma kullanılan her bir algoritmanın eğitim işlemi gerçekleştikten sonra test verileri kullanılarak algoritmaların sınıflandırma başarısı kontrol edilmiştir. Algoritmaların performanslarını değerlendirmek amacıyla sırasıyla doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-skoru ve AUC metrikleri kullanılmıştır. Bununla birlikte, uygulanan testlerin ayırt ediciliğini belirlemek amacıyla ROC (Alıcı işlem karakteristikleri, Receiver Operating Characteristic) eğrisi yöntemi kullanılmıştır. ROC eğrisi yöntemiyle bir testin, hastalık teşhisi olan bireyleri sağlıklılardan ne kadar doğrulukla ayırt edebildiğinin bilinmesi mümkün olabilmektedir [19]. ROC eğrisinin altında kalan alan, uygulanmış testlerin hastalar ile hasta olmayan bireyleri ayırt etme konusundaki doğruluk oranını belirler.

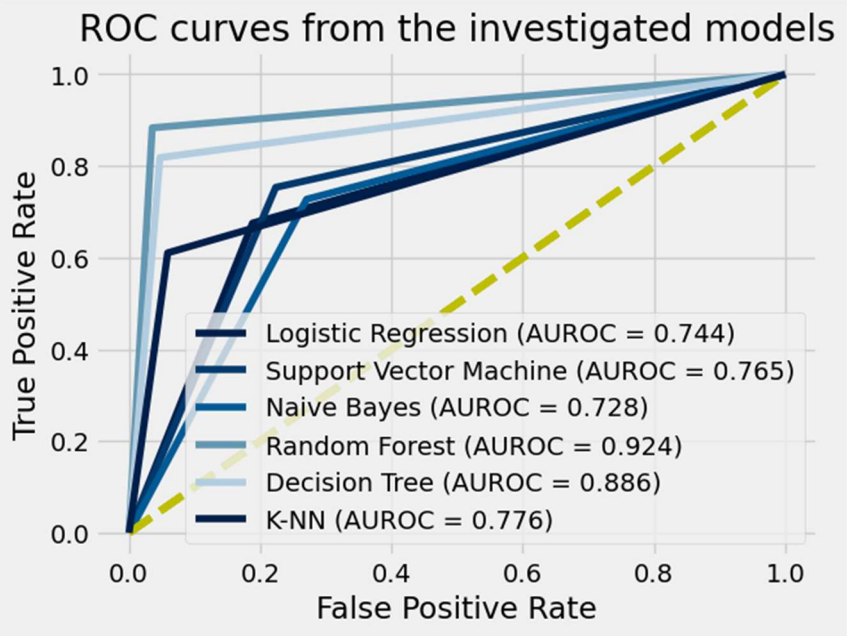
III. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında akciğer kanserinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılan makine öğrenme algoritmaları ve algoritmaların tahmin oranlarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan sırasıyla doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru değerleri Tablo 2 ve Şekil 1'de sunulmuştur. Tablo 2 ve Şekil 1 incelendiğinde, Rastgele Orman algoritması 92.59% doğruluk, 95.77% kesinlik, 88.31% duyarlılık ve 91.89% F1-skor oranları ile diğer modellerden daha yüksek bir tahmin oranına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Algoritmaların değerlendirilmesi

Algoritmalar	**Doğruluk (%)**	**Kesinlik (%)**	**Duyarlılık (%)**	**F1-Skoru (%)**
Lojistik Regresyon	74.69	76.47	67.53	71.72
Destek Vektör Makinesi	76.54	75.32	75.32	75.32
Naive Bayes	72,84	70,89	72.73	71.79
Rastgele Orman	92.59	95.77	88.31	91.89
Karar Ağacı	88.89	94.03	81.82	87.5
K-NN	78.4	90.38	61.04	72.87

Rastgele Orman algoritmasının diğer algoritmalara göre üstün tahmin performansının onaylandığı, önerilen algoritmaların AUC-ROC eğrileri Şekil 1'de sunulmuştur. AUC-ROC eğrilerinin değerlendirilmesi sonucunda da, Rastgele Orman algoritması 0.924 AUC-ROC oranı ile en yüksek tahmin oranına ulaşmıştır.



Şekil 1. ROC eğrisi analizi

IV. TARTIŞMA

Akciğer kanseri diğer kanser türlerinden farklı olarak çıplak gözle görülemeyen ve belirtilerine sıklıkla başka hastalık belirtileri de eşlik eden bir hastalık türüdür. En sık görülen belirtileri nefes darlığı, alerji astım ve öksürüktür. Risk faktörlerinin izlenmesi, klinik takip muayenesi ve erken tanı yolu ile bu hastalığın hoş olmayan etkilerini önleyebilecek ve sınırlandırabilecek yöntemler akciğer kanserinden dolayı oluşabilecek olumsuz sonuçları azaltmak için önem arz etmektedir. Makine öğrenme yöntemleri klinisyenler için çeşitli hastalıkların erken tanısı, tahmini ve prognozu açısından günden güne önem kazanmaktadır. Hastalıkların gelişimi ve önlenmesi amacıyla geleceğe dair tahminlerde bulunabilecek makine öğrenme algoritmaları gibi güncel yöntemlerin kullanılması literatürde yaygındır. Bu çalışmada, akciğer kanseri olan hastaların genel olarak maruz kaldığı risk faktörleri ve yakalanmış oldukları semptomları içeren kamuya açık erişimi olan bir veri seti üzerinde farklı makine öğrenme algoritmalarından faydalanarak akciğer kanserinin tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan veri setinde sınıf dağılımının dengesizdir. Bu nedenle, sınıf dağılımının dengeli bir hale getirilmesi amacıyla SMOTE tekniğinden yararlanılmıştır. Akciğer kanserinin tahmin edilmesi içinde altı farklı sınıflandırıcı kullanılmıştır. Ağaç modellerinden olan Rastgele Orman algoritması diğer modellere kıyasla daha yüksek doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-skoru ve AUC-ROC oranlarına ulaşmıştır.

Her ne kadar bu çalışmada akciğer kanserinin tahminine dair umut verici sonuçlar elde edilse de, kullanılan veri seti kamuya açık bir veri setine dayanmaktadır. Bir hastaneden veya bir enstitüden elde edilebilecek bir veri setinin kullanılması daha zengin öznitelikler sağlayabilirdi. Ancak hassas tıbbi verilere erişim hasta mahremiyeti açısından zordur. Bu çalışmada kullanılan veri seti güvenilir ve doğru araştırma sonuçları elde edilmesini sağlayan özniteliklere sahip ve literatürde sıklıkla kullanılan bir veri setiydi.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada farklı makine öğrenme algoritmalarından faydalanarak sigara içme, alerji, alkol ve öksürme gibi farklı semptomları içeren bir veri seti üzerinde akciğer kanserini tahmin etmeye çalıştık. Algoritmaların farklı performans metrikleri kullanarak tahmin oranlarının karşılaştırılması sonucunda, Rastgele Orman algoritması 92.59% doğruluk ve 0.924 AUC-ROC oranları ile akciğer kanserini tahmin etmede diğer modellerden daha iyi bir performans göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda, farklı öznitelik seçim algoritmaları kullanarak akciğer kanseri için en önemli olan risk faktörleri ve semptomların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Thai A.A., Solomon B.J., Sequist L.V., Gainor J.F., Heist R.S, " Lung cancer", *Lancet,* 398:535–554, 2021.
[2] Svoboda E. "Artificial intelligence is improving the detection of lung cancer," *Nature,* 587: S20–S22, 2020.
[3] Dela Cruz, Charles & Tanoue, Lynn & Matthay, Richard. "Lung Cancer: Epidemiology, Etiology, and Prevention," *Clinics in chest medicine,* 32. 605-44, 2011.
[4] Wright GS, Gruidl ME. "Early detection and prevention of lung cancer," *Current Opinion Oncology,* 12: 143-8, 2000.
[5] Understanding Lung Cancer, A guide for people with cancer, their families and friends, Cancer Council, *Cancer Council Australia,* 2022.
[6] Smith RA, Andrews KS, Brooks D, Fedewa SA, Manassaram-Baptiste D, Saslow D, Wender RC. "Cancer screening in the United States, 2019: a review of current American Cancer Society guidelines and current issues in cancer screening." *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 69:184–210, 2019.
[7] Aberle DR, Berg CD, Black WC, Church TR, Fagerstrom RM, Galen B, Gareen IF, Gatsonis C, Goldin J, Gohagan JK, Hillman B, Jaffe C, Kramer BS, et al., and National Lung Screening Trial Research Team. "The National lung screening trial: overview and study design," *Radiology,* 258:243–53, 2011.
[8] Hu J, Qian GS, Bai CX, and Lung Cancer Study Group of Chinese Thoracic Society and Chinese Alliance Against Lung Cancer Expert Group. "Chinese consensus on early diagnosis of primary lung cancer," *Cancer*, 121:3157–64, 2015.
[9] Kaul V, Enslin S, Gross SA." History of artificial intelligence in medicine." *Gastrointest Endoscopy,* 92(4):807–12, 2020.
[10] Dhal P, Azad C. "A comprehensive survey on feature selection in the various fields of machine learning." *Appl Intell,* 52(4):4543, 2022.
[11] Richens, J.G., Lee, C.M. & Johri, S. "Improving the accuracy of medical diagnosis with causal machine learning." *Nature Communication* ,11, 3923, 2020.
[12] Prelaj A, Boeri M, Robuschi A, Ferrara R, Proto C, Lo Russo G, et al. "Machine learning using real-world and translational data to improve treatment selection for NSCLC patients treated with immunotherapy." *Cancers.* 14(2):435, 2022.
[13] Ahsan MM, Luna SA, Siddique Z. "Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review." *Healthcare (Basel)* ,10(3):541, 2022.
[14] K. Kourou, T. P. Exarchos, K. P. Exarchos, M. V. Karamouzis and D. I. Fotiadis, "Machine learning applications in cancer prognosis and prediction", *Computational and Structural Biotechnology Journal*, vol. 13, pp. 8-17, 2015
[15] S. S. Raoof, M. A. Jabbar and S. A. Fathima, "Lung Cancer Prediction using Machine Learning: A Comprehensive Approach," *2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, pp. 108-115, 2020.
[16] M. Gomathi and P. Thangaraj, "A Computer-Aided Diagnosis System for Detection of Lung Cancer Nodules using Extreme Learning Machine", *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 5770-5779, 2010.
[17] Lung Cancer Prediction Dataset. [Online] Available: https://www.kaggle.com/datasets/mysarahmadbhat/lung-cancer .
[18] Chawla NW, Bowyer KW., Hall LO, Kegelmeyer PW, "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique", *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357, 2002.
[19] Zou K.H., O'Malley A.J. et al. "Receiver-Operating Characteristic Analysis for Evaluating Diagnostic Tests and Predictive Models." *Circulation* 115,654-657, 2007.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama Tabanlı Fiber Üzerinden Radyo Haberleşmesinde İkili Faz Kaydırmalı Modülasyon Tekniğinin Performans Analizi

Fatih HAYIR [a,b,], Sait Eser KARLIK [c]*

[a] Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Astsubay Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Yalova/Türkiye.
[b] Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, Bursa/Türkiye.
[c] Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye.
[*] **Sorumlu Yazar: fhayir@msu.edu.tr**

ÖZET

21. yüzyılın başlarından itibaren internet kullanımının artması ve kablosuz haberleşme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, geniş bantlı ve yüksek kapasiteli haberleşme sistemleri ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Fiber üzerinden radyo (radio over fiber, RoF) haberleşmesi, bu ihtiyacı karşılamak amacıyla, yüksek veri hızları, düşük gecikme süresi ve uzun mesafeli haberleşme imkânı sağlamaktadır. Bu çalışmada, 5 Gbps veri hızında dalgaboyu bölmeli çoğullama (wavelength division multiplexing, WDM) tabanlı fiber üzerinden radyo haberleşme sistemlerinde, ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) modülasyon tekniğinin performansı, Optisystem 7.0 programının kullanıldığı benzetimler yardımıyla incelenmiştir. Sistemin fiber hat uzunluğu ve giriş işaret gücü değiştirilerek, kalite faktörü (quality factor, Q factor) ve bit-hata oranı (bit error rate, BER) üzerindeki değişimler belirlenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, 30 km fiber hat uzunluğu için, 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslı kanallarda, maksimum kalite faktörü sırasıyla 12.8476 ve 12.8179; minimum BER sırasıyla 4.43586×10^{-38} ve 6.50522×10^{-38} olarak 10 dBm giriş işaret gücünde elde edilmiştir. Ayrıca, giriş işaret gücü 10 dBm iken, 10 km, 30 km ve 50 km fiber uzunluklarında, kalite faktörü ve BER incelenmiş; en iyi sonuçlar 10 km fiber uzunluklu sistemlerde elde edilmiş olup 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslı kanallarda, kalite faktörü sırasıyla 13.3904 ve 13.2298, BER sırasıyla 3.43771×10^{-41} ve 2.95172×10^{-40} olarak gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: BPSK, *optik fiber, RoF, WDM*

Performance Analysis of Binary Phase Shift Keying Modulation Technique in Wavelength Division Multiplexing Based Radio Over Fiber Communication

*Fatih HAYIR [a, b, *], Sait Eser KARLIK [c]*

[a] National Defence University, Naval Petty Officer Vocational HE School, Department of Electronics and Automation, Yalova/Türkiye.
[b] Bursa Uludağ University, Graduate School of Natural & Applied Science, Electronics Engineering MSc. Program, Bursa/Türkiye.
[c] Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Bursa/Türkiye.
[*] **Corresponding Author: fhayir@msu.edu.tr**

ABSTRACT

With increasing internet usage and development of wireless communication technologies since beginning of the 21st century, the need for broadband and high-capacity communication systems has emerged. Radio over fiber (RoF) communication technology provides high data rates, low latency and communication over long distances. In this paper, performance of binary phase shift keying (BPSK) modulation on wavelength division multiplexing (WDM)-based RoF systems having 5 Gbps data rates has been analyzed with simulations using Optisystem 7.0. By changing fiber link lengths and input signal powers, changes in the quality factor (Q-factor) and the bit error rate (BER) have been observed. According to simulation results, for 30 km link length, maximum Q-factor has been determined as 12.8476 and 12.8179, respectively, and minimum BER as 4.43586×10^{-38} and 6.50522×10^{-38}, respectively in channels with 193.1 THz and 193.2 THz frequencies for 10 dBm input power. Furthermore, Q-factor and BER values have been analyzed for 10 dBm

input power and 10 km, 30 km and 50 km link lengths. The best results have been obtained in systems having 10 km link lengths for Q-factor as 13.3904 and 13.2298, respectively, and for BER as 3.43771×10^{-41} and 2.95172×10^{-40}, respectively in channels with 193.1 THz and 193.2 THz frequencies.

Keywords: BPSK, *optical fiber, RoF, WDM*

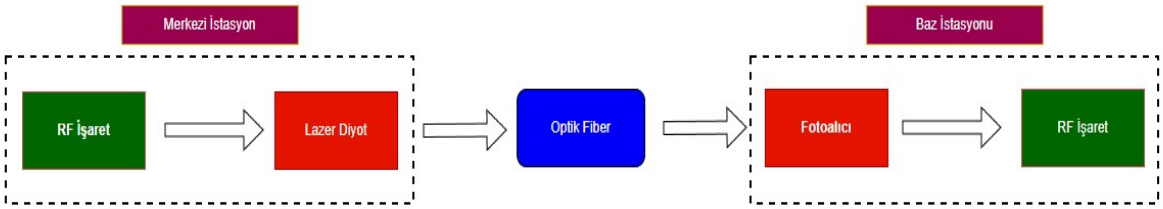
I. GİRİŞ

Günümüzde teknoloji dünyasında internet kullanımının artışıyla birlikte haberleşme sistemlerinin önemi günden güne artmaktadır. Kablosuz mobil haberleşme sistemleri devrimi birinci jenerasyon olan 1G ile başlar. 1G sistemi, 1980'lerin başında sesli görüşmelerin yapılması için kullanılan, hızı 2.4 kbps'ye kadar çıkan analog hücresel bir sistemdir. Sonrasında 2G teknolojisi sayısal teknoloji ve ağ altyapısıyla oluşturulmuş olup zaman bölüşümlü çoklu erişim (TDMA), kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA), sayısal modülasyon yöntemleri kullanılmıştır ve metin mesajlaşmasına (SMS) olanak sağlar. Hücresel kablosuz sistemlerin gelişimiyle birlikte 3G teknolojisine geçiş yapılmıştır. Bu teknolojinin amacı, 144 kbps'den 384 kbps'ye kadar kablosuz veri hizmeti sağlamaktır. 4G teknolojisinin gelişimi ve kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte, düşük gecikme süreleri ve yüksek veri hızları ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Video konferans, internet üzerinden oynanan oyunlar, nesnelerin interneti kavramı ile internete bağlı olan akıllı cihazlar gibi birçok kullanıcı üzerinden veri alışverişi gerçekleşmeye başlamıştır. Kullanıcı sayısının her geçen yıl artmasından dolayı hücresel ağlarda veri trafiği yoğunluğu ve bant yetersizliği oluşmaktadır [1, 2]. Dolayısıyla, genişbant ağı ve yüksek iletim hızı avantajlarından dolayı, veri iletimi optik fiberler üzerinden gerçekleşmeye başlamıştır. Optik fiberli haberleşmenin düşük işaret zayıflaması ve radyo frekans (radio frequency, RF) işaretlerinden ayrı bir iletim ortamı kullanılması, başlıca tercih noktalarından biri olmaktadır [3]. Bu gelişmelerden itibaren, tasarımcılar optik ve telsiz ağ yapılarının entegrasyonu ile hibrit bir yapı olan fiber üzerinden radyo haberleşmesi (radio over fiber, RoF) teknolojisini önermiştir [4]. Bu çalışmada, 5 Gbps veri hızında dalgaboyu bölmeli çoğullama (wavelength division multiplexing, WDM) tabanlı RoF haberleşmesinin, ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) sayısal modülasyon tekniği ile 5 GHz modülatör frekanslı hibrit yapısının benzetimi gerçekleştirilmiştir. RF işaretleri BPSK modülasyonu ile modüle edilerek, merkez frekansı 193.1 THz ve 193.2 THz değerindeki lazer diyotlar ile birlikte Mach-Zender Modülatörü üzerinden yoğunluk modülasyonu kullanılarak ışık işaretine dönüştürüldükten sonra; WDM çoğullama yöntemi yardımıyla optik fiber hat üzerinden kuvvetlendirici ile güçlendirilerek baz istasyonuna dağıtılmaktadır. Baz istasyonu tarafında ise, alınan ışık işaretleri fotoalıcı tarafından elektriksel işarete dönüştürülerek, bit hata oranı (bit error rate, BER) analizörü aracılığıyla benzetim performansı incelenmektedir. Çalışmanın amacı, WDM tabanlı RoF-BPSK yapısının fiber hat uzunluğu, giriş gücü ve veri hızı değerleri değiştirilerek, sistem üzerindeki göz diyagramı, kalite faktörünü ve BER'i gözlemlemektir.

II. ROF HABERLEŞMESİ

RoF haberleşmesi kavramı, radyo frekans işaretlerinin optik fiber hatlar üzerinden iletilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu teknik, optik fiber hatların düşük zayıflama kaybı ve radyo frekans işaretlerinin kablosuz ağ yapısı üzerindeki esneklik avantajlarıyla harmanlanmıştır. Ayrıca optik fiberin sağlamış olduğu bant genişliği ve taşınan mesaj işaretinin gürültüye karşı bağışıklığı nedeniyle, RoF haberleşme sistemlerinin 5G ve 6G haberleşme teknolojisinde önemli bir paya sahip olması beklenmektedir [5,6].

Şekil 1'de temel bir RoF sistem yapısı gösterilmiştir. RoF sistem yapısı, bir merkezi istasyon (Central Station-CS), baz istasyonu (Base Station-BS) ve optik fiber iletim ortamından oluşmaktadır. Merkezi istasyon tarafı, işaret üzerinde anahtarlama, yönlendirme gibi kompleks işlemlerin gerçekleştirildiği yapıdır. Baz istasyonu tarafı ise işaretin optik işaretten elektriksel işarete ya da elektrik işaretinden optik işarete dönüştürülme işleminin gerçekleştirildiği yapıdır. Bu yapı üzerinde herhangi bir işaret işleme işlevi gerçekleşmez. Merkez istasyon tarafında üretilen RF işareti lazer diyot tarafından yoğunluk modülasyonu ile ışık işaretine dönüştürülerek optik fiber üzerinden alıcı tarafa ulaştırılmaktadır. Baz istasyonu tarafında ise fotoalıcı yardımıyla ışık işaretinden RF işarete tekrardan dönüştürülmektedir. Dönüştürülen RF işareti anten vasıtasıyla son kullanıcıya ulaştırılmaktadır [7,8].



Şekil 1. Temel RoF Sistem Yapısı

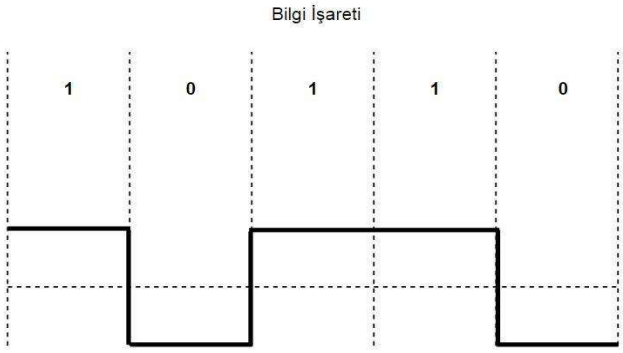
III. BPSK MODÜLASYONU

BPSK modülasyonunda, gönderilen işaretin fazının 0 ve 180° arasında değiştirilmesi ile lojik 1 ve lojik 0 değerleri için iki ayrı taşıyıcı işaret kullanılmaktadır. Lojik 0 için bilgi işaret değeri -1 ile çarpılırken, lojik 1 için bilgi işareti değişmemektedir. Gürültüden en az seviyede etkilenmesinden dolayı, uydu haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. BPSK için taşıyıcı frekansı f_c iken iletilen işaret

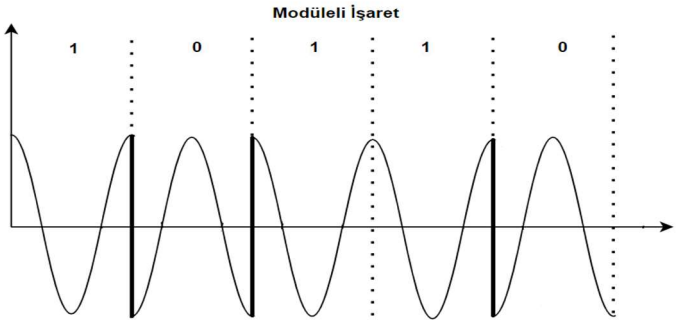
$$m(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t + \emptyset_1) \text{ , bilgi işareti lojik 1 ise } (s_1(t) \text{ taşıyıcısı}) \\ A\cos(2\pi f_c t + \emptyset_0) \text{ , bilgi işareti lojik 0 ise } (s_0(t) \text{ taşıyıcısı}) \end{cases} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu durumda, bilgi işareti lojik 1 ise $s_1(t)$ taşıyıcısı faz değeri 0 seçilerek $m(t) = A\cos(2\pi f_c t)$; bilgi işareti lojik 0 ise $s_0(t)$ taşıyıcısı faz değeri 180° seçilerek $m(t) = A\cos(2\pi f_c t + \pi)$ şeklinde iletilebilmektedir.

Şekil 2'de, sözde rassal sayı üreteci (pseudo random bit sequence generator-PRBS) tarafından üretilen lojik 1 ve 0'lardan oluşan bir bilgi işareti görülmektedir. Bu bilgi işaretinin sinüsoidal formdaki taşıyıcı ile çarpılması sonucunda, Şekil 3'te görülen BPSK işareti üretilmektedir [9].



Şekil 2. Bilgi işareti



Şekil 3. BPSK modülasyonlu işaret

IV. BENZETİM MODELİ

Bu çalışmada, WDM-RoF-BPSK sisteminin performansı, BER ve kalite faktörü parametreleri yardımıyla incelenmiştir.

A. BER

Benzetim sonuçlarından sistemin performansını belirlemede, BER, kullanılan en önemli parametrelerden biridir. $N_{hatalı}$ alıcı tarafta alınan hatalı bit sayısını, N_{toplam} ise iletilen bitlerin toplam sayısını gösterirken,

$$BER = \frac{N_{hatal}}{N_{toplam}} \tag{2}$$

ile hesaplanır.

B. KALİTE FAKTÖRÜ

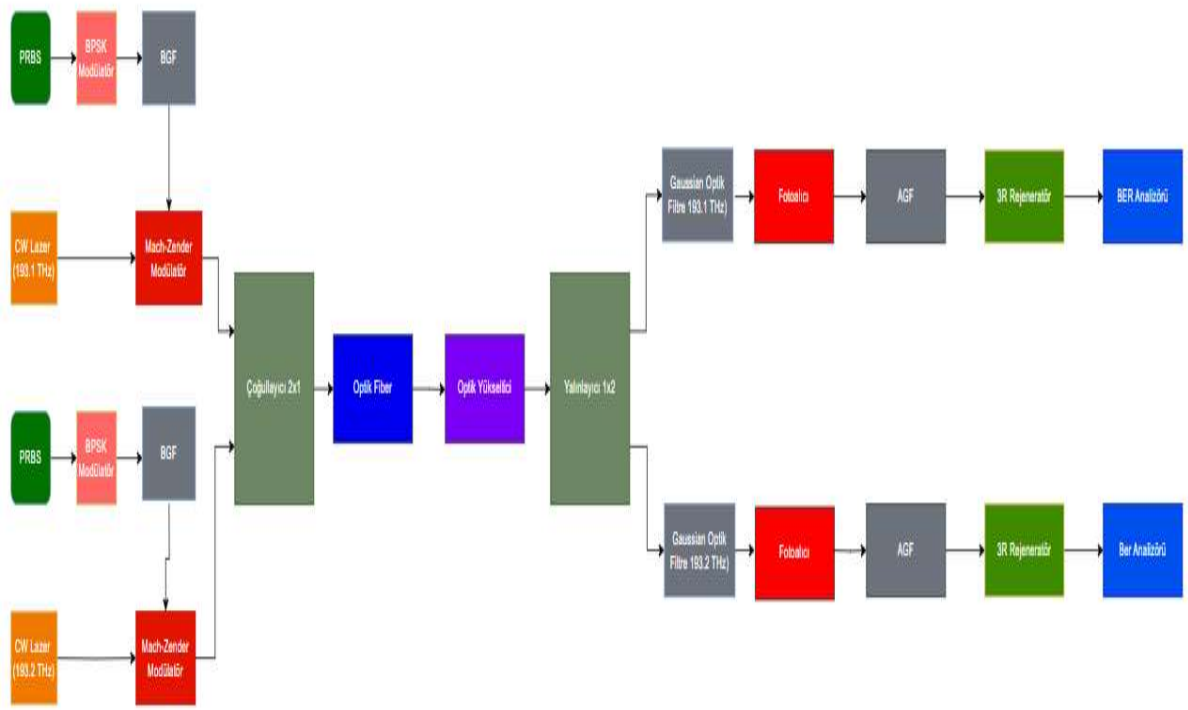
Kalite faktörü, alıcı tarafında elde edilen işaret kalitesini gösteren bir parametre olup;

$$Kalite\ Faktörü = \frac{Egöz}{\sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_1^2}} \quad (3)$$

ile tanımlanır. $Egöz$ değeri göz yüksekliğini ifade etmekte olup;

$$Egöz = I_1(\min) - I_0(\max) \quad (4)$$

ile belirlenir. (3) ve (4) formüllerinde, σ_1 ve σ_2, sırasıyla lojik 1 ve lojik 0 işaretlerinin standart sapmaları; $I_1(\min)$, lojik 1 işaretinin minimum eşik akım değerini; $I_0(\max)$ ise lojik 0 işaretinin maksimum eşik akım değerini ifade etmektedir.



Şekil 4. Benzetim Modeli

WDM tabanlı RoF haberleşme sistem yapısını incelemek üzere Şekil 4'te görülen benzetim modeli kullanılmıştır. Benzetim modelinde, 5 Gbps hızında çalışan PRBS tarafından üretilen lojik 1 ve lojik 0 işaretleri, faz modülatörü yapısına girmektedir. Faz modülatörünün çıkışında elde edilen radyo frekans işareti bant geçiren filtreden geçirilir. Sonrasında işaret, Mach-Zender modülatör kullanılarak 193.1 THz merkez frekanslı ışık işaretine dönüştürülür. Aynı işlemler, 193.2 THz merkez frekanslı ışık işaretinin üretilmesi için uygulandıktan sonra, elde edilen farklı frekanslardaki ışık işaretleri dalgaboyu bölmeli çoğullayıcı yapısına girmektedir. 193.1 THz ve 193.2 THz merkez frekanslı optik işaretler, 10 km/20 km/50 km uzunluklu optik fiber hattan iletilip optik yükselteç tarafından kuvvetlendirilerek baz istasyonuna iletilmektedir. Baz istasyonu tarafından alınan optik işaretlerin her biri, 193.1 THz ve 193.2 THz merkez frekanslı Gauss BPF'den geçirilerek fotoalıcı tarafından elektriksel işarete

dönüştürülmektedir. Daha sonra, elektriksel işaret, yüksek frekans etkilerini sönümlemek için, Chebyshev alçak geçiren filtreden (low pass filter-LPF) geçirilerek BER analizörüne iletilmektedir.

Benzetimler, Şekil 4 ile verilen ve yukarıda açıklanan benzetim modeli ile Tablo 1'de verilen benzetim parametreleri kullanılarak, Optisystem 7.0 benzetim programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Benzetim Parametreleri

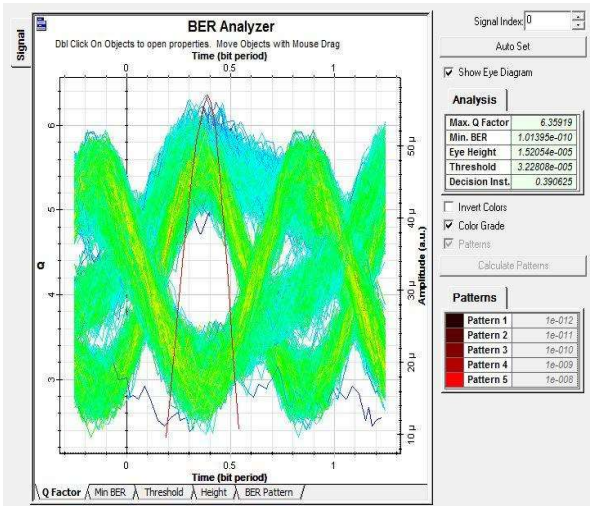
Modülatör Frekansı	**5 GHz**
Veri Hızı	**5 Gbps**
Optik Fiber Referans Dalgaboyu	**1550 nm**
Optik Fiber Zayıflaması	**0.2 dB/km**
Dispersiyon Katsayısı	**16.75 ps/nm/km**
Modülasyon Türü	**BPSK**
Sürekli Dalga Lazeri Frekansları	**193.1 THz & 193.2 THz**
Lazer Gücü	**-15 dBm, -10 dBm, 10 dBm, 15 dBm**
Fiber Türü	**Tek Modlu Fiber**
Fiber Hat Uzunluğu	**10 km, 30 km, 50 km**
Bant Geçiren Filtre Türü **Bant Geçiren Filtre Kesim Frekansı**	**Gaussian Filtre** **5 GHz**
Optik Yükseltici Gücü	**20 dB**
Alçak Geçiren Filtre Türü **Alçak Geçiren Filtre Kesim Frekansı**	**Chebyshev Filtre** **3.75 GHz**

V. BENZETİM SONUÇLARI

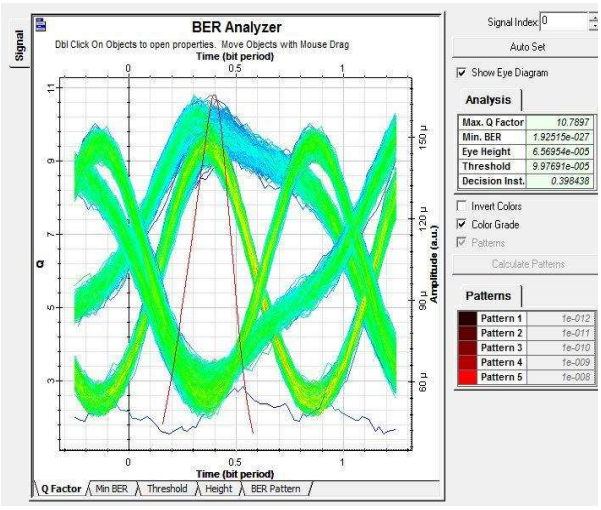
30 km fiber uzunluğunda, lazer giriş gücünün -15 dBm/-10 dBm /10 dBm /15 dBm değerleri için elde edilen benzetim sonuçları, 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslı kanallar için, sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da; ilgili benzetimler sonucunda elde edilen kalite faktörü ve BER değerleri ise, aynı kanallar için sırasıyla, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Şekil 5 ve Tablo 2 birlikte değerlendirilip değişken lazer güç değerlerinde sistemin kalite faktörü incelendiğinde, en düşük değer, lazer giriş gücü -15 dBm iken 6.35919 ile; en yüksek değer ise, lazer giriş gücü 10 dBm olduğunda 12.8476 ile elde edilmiştir. BER en düşük değerini, lazer giriş gücünün 10 dBm olduğu durumda 4.43586×10^{-38} ile alırken; en yüksek değerini, lazer giriş gücü -15 dBm iken 1.01395×10^{-10} ile almaktadır.

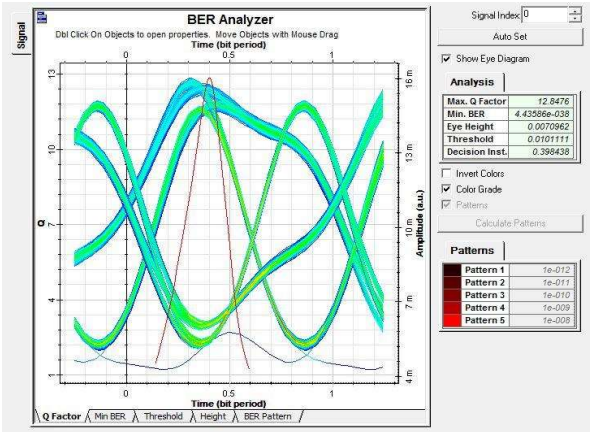
Şekil 6 ve Tablo 3 birlikte değerlendirilip değişken lazer güç değerlerinde sistemin kalite faktörü incelendiğinde, en düşük değer, lazer giriş gücü -15 dBm iken 6.40307 ile; en yüksek değer ise, lazer giriş gücü 10 dBm olduğunda 12.8179 ile elde edilmiştir. BER en düşük değerini, lazer giriş gücünün 10 dBm olduğu durumda 6.50522×10^{-38} ile alırken; en yüksek değerini, lazer giriş gücü -15 dBm iken 7.61091×10^{-11} ile almaktadır.



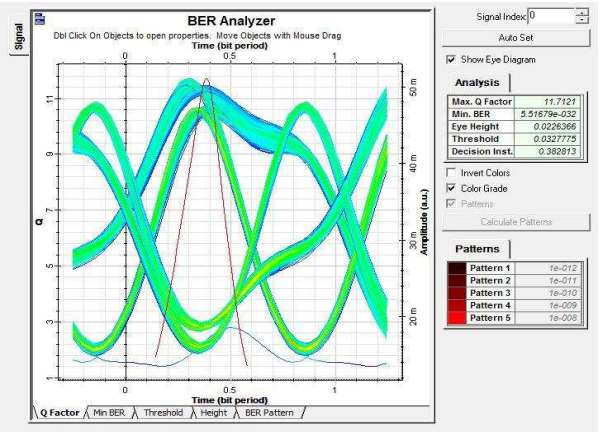
a) Pgiriş = -15 dBm iken



b) Pgiriş = -10 dBm iken



c) Pgiriş = 10 dBm iken

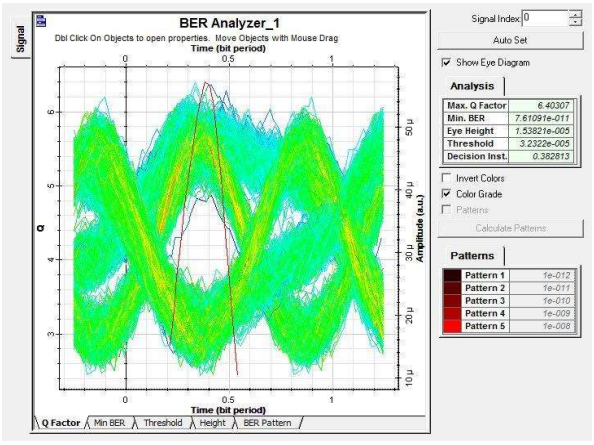


d) Pgiriş = 15 dBm iken

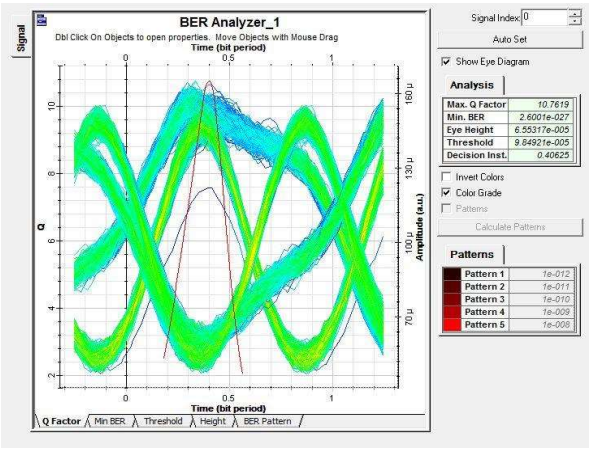
Şekil 5. Değişken lazer giriş gücü değerlerinde 193.1 THz frekanslı kanalda elde edilen göz diyagramları

Tablo 2. Değişken lazer giriş gücü değerlerinde 193.1 THz frekanslı kanalın kalite faktörü ve BER performansı

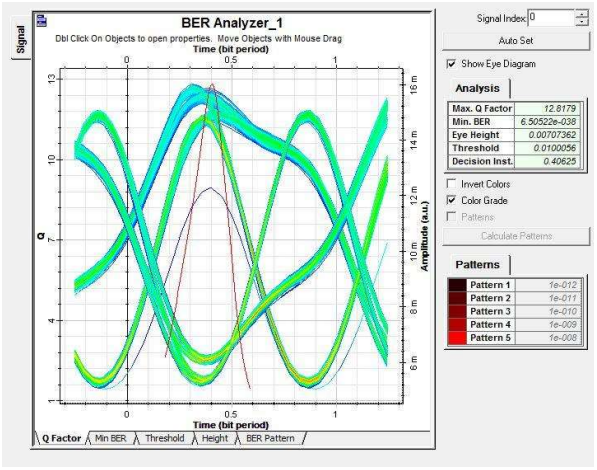
Parametreler	Fiber Uzunluğu L = 30 km , Lazer Frekansı f = 193.1 THz			
	Pgiriş= -15 dBm	Pgiriş= -10 dBm	Pgiriş= 10 dBm	Pgiriş= 15 dBm
Kalite Faktörü (Q-Factor)	6.35919	10.7897	12.8476	11.7121
Bit Hata Oranı (BER)	1.01395×10^{-10}	1.92515×10^{-27}	4.43586×10^{-38}	5.51679×10^{-32}



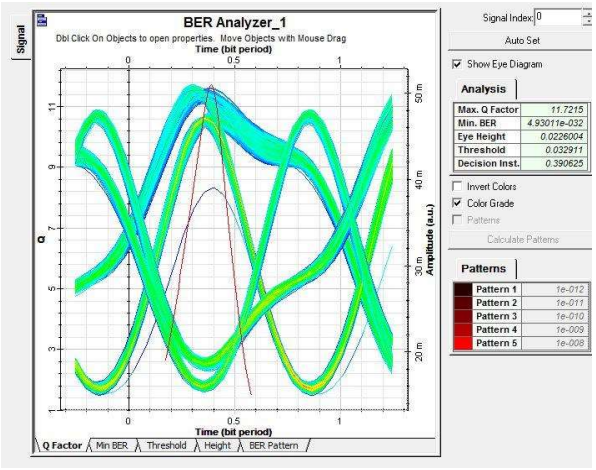
a) Pgiriş = -15 dBm iken



b) Pgiriş = -10 dBm iken



c) Pgiriş = 10 dBm iken



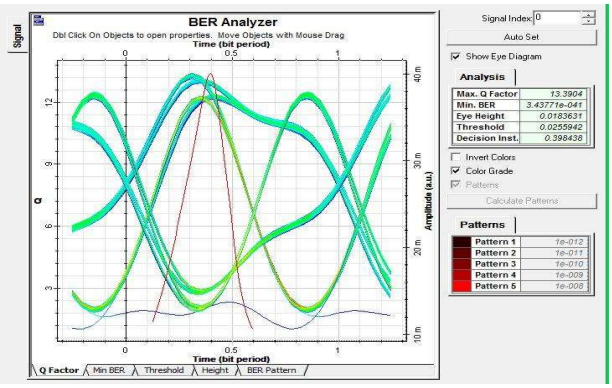
d) Pgiriş = 15 dBm iken

Şekil 6. Değişken lazer giriş gücü değerlerinde 193.2 THz frekanslı kanalda elde edilen göz diyagramları

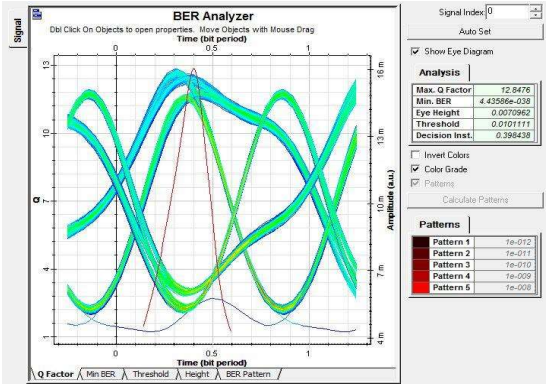
Tablo 3. Değişken lazer giriş gücü değerlerinde 193.2 THz frekanslı kanalın kalite faktörü ve BER performansı

Parametreler	Fiber Uzunluğu L = 30 km , Lazer Frekansı f = 193.2 THz			
	Pgiriş= -15 dBm	Pgiriş= -10 dBm	Pgiriş= 10 dBm	Pgiriş= 15 dBm
Kalite Faktörü (Q-Factor)	6.40307	10.7619	12.8179	11.7215
Bit Hata Oranı (BER)	7.61091×10^{-11}	2.6001×10^{-27}	6.50522×10^{-38}	4.93011×10^{-32}

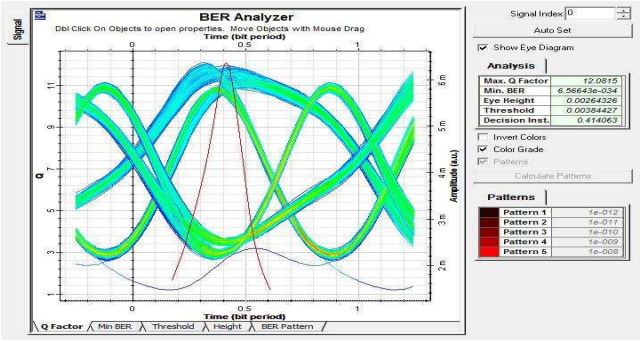
Lazer giriş gücü 10 dBm değerinde sabit iken, optik fiber hat uzunluğunun 10 km/30 km/50 km değerleri için elde edilen benzetim sonuçları, 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslı kanallar için, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de; ilgili benzetimler sonucunda elde edilen kalite faktörü ve BER değerleri ise, aynı kanallar için sırasıyla, Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir.



a) L = 10 km iken



b) L = 30 km iken



c) L = 50 km iken

Şekil 7. Değişken optik fiber hat uzunluğu değerlerinde 193.1 THz frekanslı kanalda elde edilen göz diyagramları

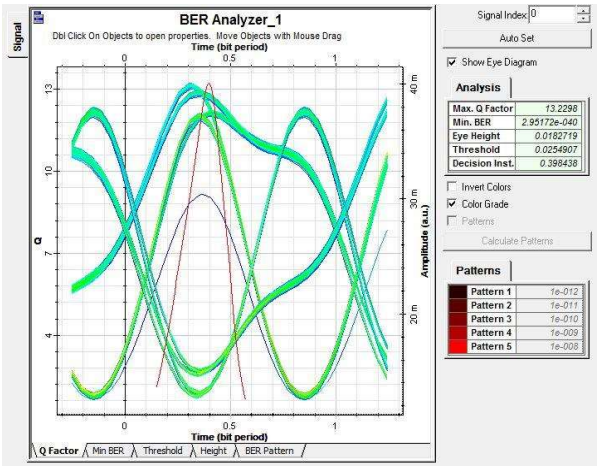
Tablo 4. Değişken optik fiber hat uzunluğu değerlerinde 193.1 THz frekanslı kanalın kalite faktörü ve BER performansı

Parametreler	Lazer Giriş Gücü Pgiriş = 10 dBm , Lazer Frekansı f = 193.1 THz		
	L = 10km	L = 30km	L = 50km
Kalite Faktörü (Q-Factor)	13.3904	12.8476	12.0815
Bit Hata Oranı (BER)	3.43771×10^{-41}	4.43586×10^{-38}	6.56643×10^{-34}

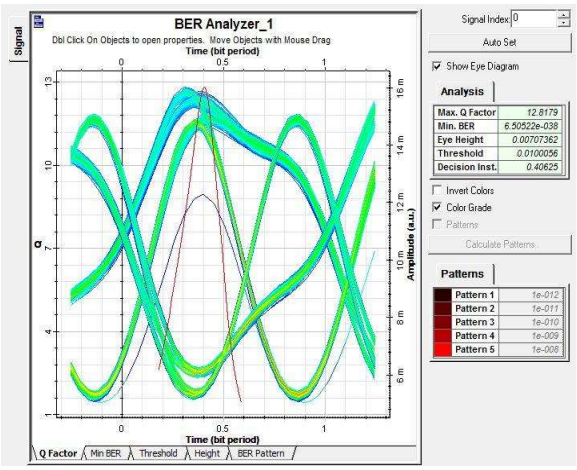
Şekil 7 ve Tablo 4 birlikte değerlendirilip değişken lazer güç değerlerinde sistemin kalite faktörü incelendiğinde, en düşük değer, optik fiber hat uzunluğu 50 km iken 12.0815 ile; en yüksek değer ise, optik fiber hat uzunluğu 10 km olduğunda 13.3904 ile elde edilmiştir. BER en düşük değerini, optik fiber hat uzunluğu 10 km olduğunda 3.43771×10^{-41} ile alırken; en yüksek değerini, optik fiber hat uzunluğu 50 km iken 6.56643×10^{-34} ile almaktadır.

Şekil 8 ve Tablo 5 birlikte değerlendirilip değişken lazer güç değerlerinde sistemin kalite faktörü incelendiğinde, en düşük değer, optik fiber hat uzunluğu 50 km iken 12.0764 ile; en yüksek değer ise, optik fiber hat uzunluğu 10 km olduğunda 13.2298 ile elde edilmiştir. BER en düşük değerini, optik fiber hat

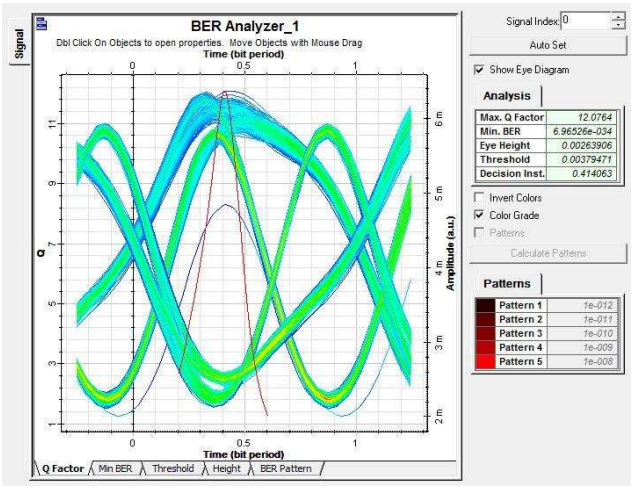
uzunluğu 10 km olduğunda 2.95172×10^{-40} ile alırken; en yüksek değerini, optik fiber hat uzunluğu 50 km iken 6.96526×10^{-34} ile almaktadır.



a) L = 10 km iken



b) L = 30 km iken



c) L = 50 km iken

Şekil 8. Değişken optik fiber hat uzunluğu değerlerinde 193.2 THz frekanslı kanalda elde edilen göz diyagramları

Tablo 5. Değişken optik fiber hat uzunluğu değerlerinde 193.2 THz frekanslı kanalın kalite faktörü ve BER performansı

Parametreler	Lazer Giriş Gücü Pgiriş = 10 dBm , Lazer Frekansı f = 193.2 THz		
	L = 10km	L = 30km	L = 50km
Kalite Faktörü (Q-Factor)	13.2298	12.8179	12.0764
Bit Hata Oranı (BER)	2.95172×10^{-40}	6.50522×10^{-38}	6.96526×10^{-34}

Benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde, değişken lazer giriş güçleri ve sabit uzunluklu (30 km) optik fiber hat için elde edilen benzetim sonuçlarında, en yüksek kalite faktörü ve en düşük BER

her iki kanal için 10 dBm giriş gücünde; değişken optik fiber hat uzunlukları ve sabit lazer giriş gücü (10 dBm) için elde edilen benzetim sonuçlarında, en yüksek kalite faktörü ve en düşük BER her iki kanal için 10 km hat uzunluğunda elde edilmiştir.

VI. SONUÇ

Bu çalışmada, frekansları 193.1 THz ve 193.2 THz olan 2 kanallı WDM-RoF yapısı üzerinde BPSK modülasyonu uygulanmıştır. Benzetimler Optisystem 7.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetimler neticesinde, sistem performansı, kalite faktörü ve BER parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Fiber uzunluğu 30 km olarak sabit tutulup lazer giriş gücü değiştirildiğinde, 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslarında en iyi performans 10 dBm'de görülmüştür. Benzetimler neticesinde, lazer giriş gücünün değişimiyle birlikte sistemin performansının etkilendiği görülmektedir. İkinci olarak, lazer giriş gücü 10 dBm'de sabit tutulup 193.1 THz ve 193.2 THz frekanslarında, fiber uzunlukları 10 km, 30 km, 50 km olarak değiştirildiğinde, en iyi performans 10 km'de görülmüştür. Burada ise fiber uzunluğunun artmasıyla birlikte sistem performansının olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] H. Yang, "Application and Development of Mobile Communication Technology," *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2021, pp. 893-896, 2021

[2] C. Lee, J. Park, T. Park, J. Kwon, H. Lee and M. Yoon, "An Efficient Networks Operation System for Private 5G Networks," *13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 1794-1796, 2022

[3] P. Kaushik, D. P. Singh and S. Rajpoot, "Fibre Optic Communication In 21st Century," *International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, pp. 125-129,2020

[4] M. Sung, J. Kim, E.-S. Kim, S.-H. Cho and Y.-J. Won, "RoF-Based Radio Access Network for 5G Mobile Communication Systems in 28 GHz MillimeterWave," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 409-420, 2020

[5] H.Khalil, F.Qamar, R.Shahzadi, A.Shahzad, M.Ali, N.Qamar, S.Al-Otaibi, "Performance Analysis of Modulation Formats for Next Generation RoF Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139393-139402, 2021

[6] J. Kim, M.Sung, S.Cho,Y.Won, B.Lim, S.Pyun, J.Lee, J.Lee, "MIMO-Supporting Radio-Over-Fiber System and its Application in mmWave-Based Indoor 5G Mobile Network," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 101-111, 2020

[7] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala and G. Campuzano, "Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1593-1619, 2013

[8] S.Singh,G.Kaur,M.Islam, R.S.Kaler, Broadband Connectivity in 5G and Beyond, Switzerland:Springer International Publishing, 2022.

[9] Ertürk S. Sayısal Haberleşme. 3. Baskı. İstanbul, Türkiye,Birsen Yayınevi, 2016.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Kompozit üretiminde değişken plaka kalınlığının nedenleri ve eğilme özelliklerine etkisi

Raif SAKİN [a*]

[a] Balıkesir Üniversitesi, Edremit Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Edremit/Balıkesir/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: rsakin@balikesir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, reçine transfer kalıplama (RTM) ile üretilen kompozit plakalarda değişken kalınlığın sebepleri ve eğilme özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla PC kontrollü, vakum destekli bir RTM prosesinden yararlanılmıştır. Bu çalışma için proseste kontrol edilen parametreler enjeksiyon basıncı (IP), kürleme basıncı (CP), enjeksiyon noktası sayısı (NIP) ve kalıp sıcaklığıdır (MT). Çalışmada kompozit plaka imalatı için RTM'ye uygun düşük viskoziteli ticari bir polyester reçine ile 500 g/m^2 birim alan ağırlığındaki iki-yönlü cam-dokuma kumaş kullanılmıştır. Proses sonunda kalıptan her biri 6 tabakalı, 0.5×0.5 m boyutlarında, farklı kalınlık (2.21–3.86 mm) ve farklı fiber hacimlerine sahip (%37.22–%44.31) toplam 10 adet kompozit plaka elde edilmiştir. Plakalardan 0°/90°, 15°/75°, 30°/60° ve 45°/45° yönlerinde numuneler kesilerek eğilme mukavemeti (UFS), eğilme modülü (FM) ve eğilme straini (FS) gibi mekanik özellikler test edilmiştir. Toplam 187 adet numune test edilmiş ve elde edilen veriler SPSS-24 yazılımıyla istatistik olarak analiz edilmiştir. Değişken plaka kalınlığının en önemli sebepleri; kürleme basıncı (-CP) ve enjeksiyon basıncı (+IP) gibi proses parametreleri iken malzeme parametresi olarak fiber hacmidir (-VF). Eğilme özelliklerini etkileyen en önemli parametreler ise fiber yönü (-DEG) ve plaka kalınlığı (-ST) olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: kompozit plaka üretimi, değişken kalınlık, eğilme özellikleri, proses ve malzeme parametreleri.

Reasons for variable thickness in the fabrication of composite plates and their effect on flexural properties

Raif SAKİN [a]

[a] Balıkesir University, Edremit Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies, Edremit/Balıkesir/Türkiye.
* Corresponding Author: rsakin@balikesir.edu.tr

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the reasons for the variable thickness and its effect on the mechanical properties of composite plates produced by resin transfer molding (RTM). A PC-controlled and vacuum-assisted the RTM process was used for this purpose. The parameters controlled in the process in this study were the injection pressure (IP), curing pressure (CP), number of injection points (NIP), and mold temperature (MT). In this study, commercially available low-viscosity polyester resin suitable for RTM and bidirectional glass fabric with an areal density of 500 g/m^2 were used for the production of composite plates. At the end of the process, a total of 10 composite plates were produced, each with six layers, 0.5×0.5 m dimensions, different thicknesses (2.21–3.86 mm) and different fiber volumes (37.22%–44.31%). Mechanical properties such as flexural strength (UFS), flexural modulus (FM), and flexural strain (FS) were tested by cutting the specimens from the plates at angles of 0°/90°, 15°/75°, 30°/60° and 45°/45°. A total of 187 specimens were tested, and the obtained data were subjected to statistical analysis using the SPSS-24 software package. The most important reasons for variable plate thickness are process parameters such as curing pressure (-CP) and injection pressure (+IP), whereas fiber volume (-VF) is a material parameter. The main parameters affecting the flexural properties were also determined as fiber direction (-DEG) and plate thickness (-ST).

Keywords: fabrication of composite plates, variable thickness, flexural properties, process and material parameters

I. GİRİŞ

Polimer kompozitler ve kompozit plakalar, metal ve alaşımlarına göre daha yüksek mukavemet/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranları sebebiyle, günümüzde birçok sektörde çok tercih edilmektedir [1, 2]. Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit plakalar ise, cam-dokuma elyaf kumaşın ısıyla daha hızlı kürleşen bir polimer reçineyle ıslatılmasıyla oluşur [3]. GFRP kompozit plakalar, öncelikli olarak havacılık ve uzay endüstrisinin yanı sıra savunma sanayi, deniz araçları, otomotiv gövde ve motor parçaları, köprüler, inşaat ve diğer altyapı uygulamaları gibi birçok endüstride kullanılmaktadır [3-5]. Dünyada son 10 yılda daha mukavemetli ve daha hafif kompozitlerin geliştirilme çalışmaları; nakliye kolaylığı ve azalan nakliye maliyeti, hasar riskinin azalması, ara yüzey kusurları ve delaminasyonun azalması, otomotiv ve havacılıkta yakıt verimliliğinin ciddi oranda artması, daha az bakım sorunu ve maliyeti, karbondioksit ve sera gazı emisyonlarını azaltılması gibi birçok olumlu özellikleri sebebiyle çok artmıştır [6-8]. Kompozit plaka imalatında ise açık veya kapalı kalıplama yöntemleri kullanılır. Reçine transfer kalıplama (RTM), makul bir maliyetle yüksek kaliteli parçaların üretebildiği için popüler bir kapalı kalıpla üretim tekniğidir. Dolayısıyla RTM prosesi, diğer yöntemlere göre atmosfere salınan uçucu emisyonları kontrol etmede oldukça avantajlıdır [9]. Sürekli fiberlerden oluşan dokuma kumaşlar ile düşük viskoziteli reçine kullanımı sebebiyle, RTM'nin karmaşık geometrili ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip yüksek performanslı kompozit üretmek için uygun maliyetli bir proses olduğu kanıtlanmıştır [10]. RTM prosesi; yüksek üretim hızı potansiyeli, bitmiş parçaların iki yüzü düzgün ve yüksek kalitesi nedeniyle havacılık ve otomotivden iş makinesi endüstrilerine kadar birçok sektörde ilgi çekmiştir. Karmaşık şekillere sahip büyük kompozit parçalar, geleneksel prepreg yatırma ve otoklav ile kürleme işlemine kıyasla RTM ile daha verimli bir şekilde üretilebilmektedir [11]. Elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemetinin artan numune kesiti (boyutu) ile azalma eğiliminde olduğu iyi bilinmektedir ve buna "kesit veya boyut etkisi" denilmektedir [12, 13]. Literatürdeki çalışmalarda; üretilen kompozit plakanın eğilme mukavemetinin kullanılan reçine tipine ve kompozitin laminat kalınlığına bağlı olduğu [14], plaka kalınlığı azaldıkça eğilme mukavemeti ve modülünün arttığı [15], hatta daha ince katmanların laminatın mekanik performansını arttırdığı tespit edilmiştir [16]. Bu durumun büyük kompozit yapıların tasarımında önemli etkisi vardır ve mutlaka kesit etkisi dikkate alınmalıdır [13]. Tasarım izinleri, genelde yapıldığı gibi küçük boyutlu numune testlerine dayanıyorsa ve boyut etkisi dikkate alınmazsa tam ölçekli yapının mukavemeti önemli ölçüde fazla tahmin edilecektir. Güvenlik açısından kritik uygulamalardaki kompozit yapılar, zaten her zaman tam boyutta test edilir. Ayrıca büyük yapılarda bile mukavemet, düşük malzeme kesitini zorlayan kuvvetin neden olduğu gerilmeyle karakterize edilir. Bununla birlikte, daha verimli kompozit yapılar geliştirmek için "maliyetli ve zaman alıcı testlere gerek kalmadan" mukavemetleri doğru tahmin etme çalışmaları devam etmektedir. Bunun için numune boyutunun mukavemet üzerindeki etkisini iyi anlamak çok önemlidir. Bu konunun önemine rağmen, bu etkiyi ölçmek için nispeten az çalışma yapılmıştır [12]. Özellikle, havacılık ve otomotiv sektöründe "alüminyum dahil metal ve alaşımları yerine kompozit kullanımıyla bileşen ağırlığı azaltma" çalışmaları sürekli devam etmektedir. Elyaf oryantasyonları, kat kalınlığı, istifleme sırası gibi malzeme sistemini optimize ederek, ağırlığı azaltmak mümkündür. Birçok araştırmacı, ağırlığı azaltmak için laminat kalınlığını en aza indirip veya optimum bir kalınlık için laminatların mukavemetini en üst düzeye çıkaracak malzemeyi hedeflemiştir. Hatta bu çalışmaların bazılarında, laminat kalınlığı ve kat açıları daimi tasarım değişkenleri olarak kabul edilmiştir [17]. Laminat kalınlığı ve ağırlığı azaltıp, aynı zamanda statik mukavemeti yüksek tutabilmenin bir başka önemli yolu da kompozit plaka üretim parametrelerinin optimizasyonudur. RTM ve VARTM ile kompozit parça üretmede; reçine özellikleri, fiber tipi ve hacmi, fiberlerin istifleme sırası ve yönü önemliyken [18], proseste ise reçine ve kalıp sıcaklığı, vakum ve enjeksiyon basıncı, enjeksiyon noktasının yeri ile kalıp geometrisi gibi değişkenler bulunmaktadır [11]. Yukarıda bahsedilen literatür özetlerinde de belirtildiği gibi, plaka kalınlığının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu, kalınlık arttıkça eğilme mukavemetinin düştüğü kanıtlanmıştır [19]. Bununla birlikte, çok az araştırmacı plaka kalınlığının kompozit plaka tipi yapıların eğilme dayanımı üzerindeki etkisine dikkat etmiştir [20]. Günümüzde özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla otomotiv sektöründe kompozit plakalar; sac metallere göre daha az ağırlık ve az enerji tüketimi, daha yüksek sönümleme ve darbe performansı ile daha düşük maliyetleri nedeniyle otomotiv parçaları için yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Örneğin gövde ve tavanda çelik yerine kompozit plaka kullanma çalışmaları hızla devam etmektedir. Bu çalışmalarda, otomotiv tavan çeliğinin eğilme rijitliği hedefi olan 20 N/mm'yi metalden daha ince CFRP plaka ile aşıldığı ispatlanmıştır [22]. Literatürde, reçine transfer kalıplama metoduyla GFRP kompozit plaka üretiminde "değişken plaka kalınlığının sebepleri ve değişken plaka kalınlığının eğilme özelliklerine etkisi" ile ilgili çalışma oldukça azdır. Bu nedenle, bu çalışma literatürdeki eksikliğe katkı sağlayacaktır.

II. MATERYAL METOT

Cam-dokuma elyaf takviyeli kompozit plaka üretimi

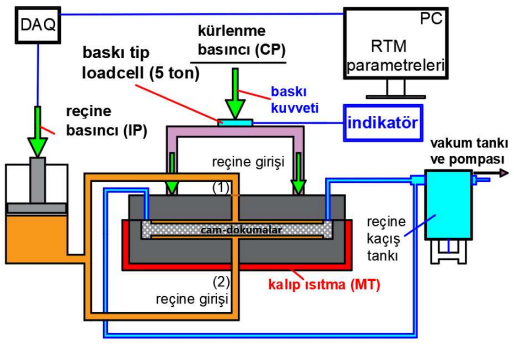
Bu çalışmada, GFRP kompozit plakaların üretimi için E-camı dokuma fitil (WR) elyaflar kullanılmıştır. WR elyaflar Şişecam Cam Elyaf A.Ş. tarafından üretilen iki eksenli cam-dokuma kumaşlardır. Reçine enjeksiyonu için Poliya A.Ş. tarafından üretilen RTM tipi düşük viskoziteli (300 Cp) ortoftalik polyester reçine ile metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt naftenat (CoNa) katalizörleri kullanılmıştır. Tablo 1'de kompozit plaka imalatında kullanılan fiber, matris ve katalizörlerin detayları görülmektedir.

Tablo 1. GFRP kompozit plaka bileşenleri ve özellikleri

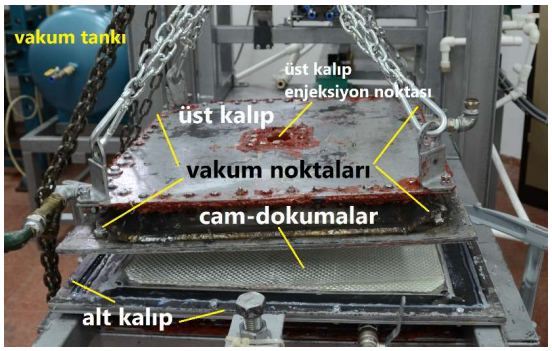
Matris (reçine)	**Fiber (WR elyaf)**
Ortoftalik polyester (Polipol™ 336) Özgül ağırlık=1.094 g/cm^3 Eğilme dayanımı=113 MPa Eğilme modülü=3.11 GPa Max. strain=%4.3 (eğilme), Poisson oranı=0.36	E-camı dokuma (500 g/m^2) Özgül ağırlık=2.54 g/cm^3, Lif çapı=12-17µm Çekme dayanımı=2306 MPa E-modülü=72.4–81.5 GPa Max. strain=%2.97 (çekme), Poisson oranı=0.22
Sertleştirici: matris hacminin %0.5'i kadar MEKP	Hızlandırıcı: matris hacminin %0.1'i kadar CoNa

Reçine transfer kalıplama (RTM) prosesi

RTM ile üretilen kompozit plakanın özelliklerini etkileyen birçok proses parametresi vardır. Bunlardan bazı önemlileri; reçine enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı, reçine giriş ve tahliye noktalarının konumu ve sayısı, fiber hacim oranı ve yapısı, vakum uygulaması ve kürleme işlemi olarak sayılabilir [23]. Bu çalışmada ise kompozit üretiminde değişken plaka kalınlığının, proses ve malzeme parametrelerine bağlı nedenleri ve eğilme özelliklerine etkisi istatiksel bir yöntemle araştırılmıştır. Bunun için Şekil 1'de şematiği verilen kapalı ve ısı kontrollü bir RTM prosesinden faydalanılmıştır. Şekil 1'deki gibi reçine, farklı enjeksiyon basınçlarıyla, kalıba üstten (1) veya hem üstten hem alttan (2) olarak iki farklı yöntem uygulanmıştır. Enjeksiyona başlamadan önce kalıba, dört köşesinden basınçlı vakum (-0.95 bar), enjeksiyon sonunda ise kalıba üstten farklı değerlerde mekanik bir kriko ile kürleme basıncı uygulanmıştır.



Şekil 1. RTM prosesi şematiği



Şekil 2. Fiberlerin yerleştirilmiş hali ile kalıbın kapanışı

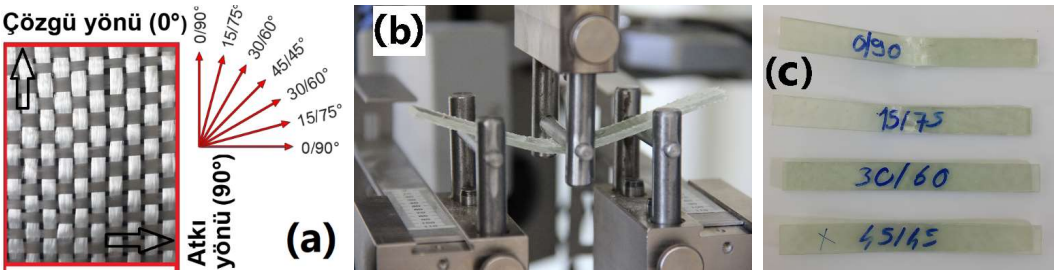
Şekil 2'de görüldüğü gibi cam-dokuma elyaflar kalıp boşluğuna 6'şar kat olacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra, alt ve üst kalıplar sızdırmazlık sağlanarak kapatılmıştır. Kalıp 40–50 °C aralığında ısıtılmış (MT) ve her plaka için kalıp ile ortam sıcaklığı kaydedilmiştir. Plakalar, sıcak kalıp içinde ve basınç altında 22–48 saat aralığında kürlemeye tabii tutulmuştur. Sonuçta, Tablo 2'de verilen farklı RTM proses ve malzeme parametreleri kullanılarak 0.5×0.5 m boyutlarında toplam 10 adet kompozit plaka üretilmiştir. Plaka numaraları, cam-dokuma fiber hacmine göre büyükten küçüğe sıralanmış olup, her plaka farklı kalınlık ve farklı fiber hacmine sahiptir (Tablo 2).

Tablo 2. Proses ve malzeme parametreleri

Parametreler	**Birim**	**Plaka no**									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Enjeksiyon basıncı (IP)	bar	2.39	1.67	2.64	5.50	3.46	4.76	4.83	3.47	4.90	5.08
Enjeksiyon noktası (NIP)	adet	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1
Kürleme basıncı (CP)	kPa	136	134	136	132	133	133	135	134	132	130
Kalıp sıcaklığı (MT)	°C	45	50	45	40	40	40	40	50	40	40
Fiber hacmi (VF)	%	44.31	44.00	43.91	42.80	41.74	41.63	41.22	40.51	38.13	37.22
Plaka kalınlığı (ST)	mm	2.63	2.68	2.72	2.79	2.82	2.83	2.91	2.92	3.10	3.21

Eğme testleri

Bu çalışmada üretilen kompozit plakalar kürleme süresi sonunda kalıptan çıkarılmıştır. Kürlenmiş plakalardan Şekil-3(a)'da görüldüğü gibi dört farklı açıda, ASTM-D7264/D7264M standardına [24] uygun eğme numuneleri (13×115 mm) kesilmiştir. Numuneler Şekil 3(b)'de görüldüğü gibi üç-noktadan eğme testlerine tabii tutularak, eğilme mukavemeti (UFS), eğilme modülü (FM) ve eğilme straini (FS) gibi eğilme özellikleri elde edilmiştir. Toplam 187 adet numune test edilmiş ve veriler SPSS-24 yazılımıyla istatistik olarak analiz edilmiştir.



Şekil 3. a) numunelerin kesim yönleri, b) üç noktadan eğme testi, b) test edilen bazı numunelerin görüntüsü

İstatistik analizler

İstatiksel değerlendirmeye geçmeden önce bütün veriler normallik ve varyansın homojenliği açısından test edilmiştir. Plaka kalınlığının diğer parametrelerle arasındaki ikili ilişkilerinin tespiti ile eğilme özelliklerinin, plaka kalınlığı (ST), fiber hacmi (VF), enjeksiyon noktası sayısı (NIP), kürleme basıncı (CP), enjeksiyon basıncı (IP), kalıp sıcaklığı (MT) ve test edilen numunelerin fiber yönleri (DEG) ile aralarındaki ilişkilerin tespiti için korelasyon analizleri yapılmıştır. Eğilme özelliklerinin proses parametreleriyle arasındaki regresyon denklemlerinin eldesi için ise çoklu regresyon analizleri yapılmıştır.

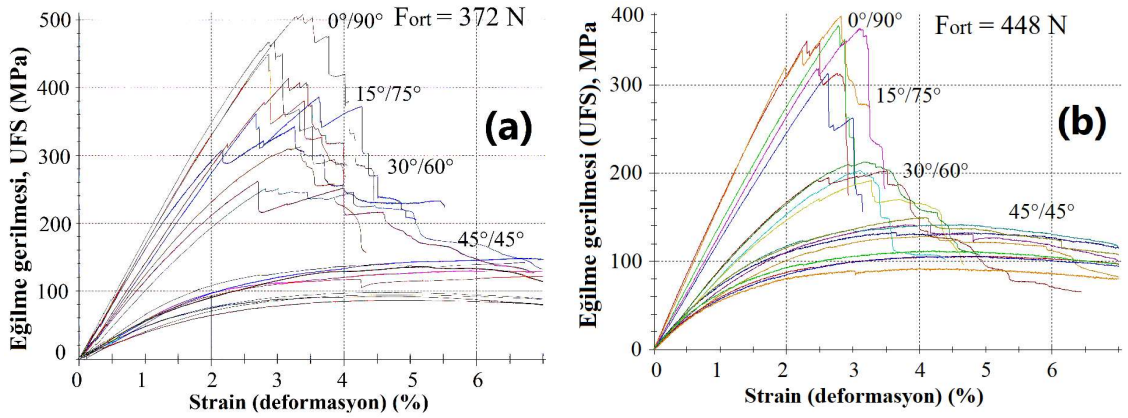
III. SONUÇLAR

Öncelikle, dört adet proses (IP, NIP, CP, MT) ve üç adet malzeme (ST, VF, DEG) parametreleri ile eğilme özelliklerine (UFS, FM, FS) ait ham veriler için, ortalama değer (ORT), standart sapma (SD), min/max değerlerin analizi ile birlikte normallik testleri yapılmıştır. Tablo 3'de görüldüğü gibi bütün verilerin çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) değerleri -2 ile +2 aralığında olduğundan verilerin normal dağıldığı varsayılmıştır [25].

Tablo 3. Proses ve malzeme parametreleri ile mekanik özellikler için ortalama, standart sapma ve min/max değerler ve normallik testleri

Parametreler	**Birim**	**Ort.**	**SD**	**Min**	**Max**	**Skewness**	**Kurtosis**	**N**
Enjeksiyon basıncı (IP)	bar	3.90	1.25	1.67	5.50	-0.43	-1.24	187
Enjeksiyon noktası (NIP)	adet	1.57	0.50	1	2	-0.29	-1.93	187
Kürleme basıncı (CP)	kPa	133.5	1.77	130.0	136.0	-0.22	-0.60	187
Kalıp sıcaklığı (MT)	°C	42.89	3.98	40	50	0.91	-0.81	187
Fiber hacmi (VF)	%	41.55	2.25	37.22	44.31	-0.62	-0.65	187
Plaka kalınlığı (ST)	mm	2.86	0.30	2.21	3.86	0.52	0.49	187
Fiber yönü (DEG)	°	21.66	16.83	0	45	0.03	-1.37	187
Eğilme özellikleri	**Fiber yönü**	**Ort.**	**SD**	**Min**	**Max**	**Skewness**	**Kurtosis**	**N**
Eğilme mukavemeti UFS (MPa)	0°/90°	402.44	88.32	169.07	613.69	-0.53	0.45	52
	15°/75°	273.80	41.91	178.20	353.02	-0.54	-0.20	42
	30°/60°	160.36	20.01	122.16	205.82	0.02	-0.74	51
	45°/45°	110.13	11.12	86.22	130.53	-0.44	-0.36	42
Eğilme modülü FM (MPa)	0°/90°	16366	3072	3782	24939	0.58	0.65	51*
	15°/75°	12109	1877	8253	16553	0.25	-0.07	42
	30°/60°	7213	781	5476	9100	-0.32	0.14	51
	45°/45°	5550	925	3569	9505	-0.77	1.03	40*
Eğilme straini FS (%)	0°/90°	3.09	0.92	1.34	7.03	0.42	1.75	51*
	15°/75°	3.26	0.52	2.24	5.00	-0.26	0.97	40*
	30°/60°	4.80	0.85	3.09	6.90	0.45	0.02	51
	45°/45°	4.73	0.50	3.43	5.89	-0.11	0.81	42

** Uç değer veya bazı uç değerler analizden çıkartılmıştır.*



Şekil 4. Ortalama kalınlıkları en düşük (1-no) ve en yüksek (10-no) olan iki plakanın eğilme gerilmesi - strain eğrileri

Şekil 4(a) ve (b)'de ortalama plaka kalınlıkları en düşük seviyedeki 1-nolu ve en yüksek seviyedeki 10-nolu iki plakanın gerilme-strain eğrileri ve özellikle fiber açılarına göre eğilme özelliklerindeki değişim görülmektedir. Diğer taraftan en ince (1-no) plakanın, en kalın (10-no) plakaya göre eğilme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kompozit laminatların yapısı gereği doğal olarak mukavemet ve modül 0°/90° yönlerde en yüksek, 45°/45° yönlerde ise en düşük seviyededir (Tablo 3 ve Şekil 4). Tablo 3 ve Şekil 4'de görüldüğü gibi diğer yönlere göre 30°/60° ve 45°/45° yönündeki numunelere ait ortalama deformasyon miktarları daha yüksektir. Hatta Şekil 3(c)'de görüldüğü gibi bu yönlerdeki bazı numunelerin çok fazla deformasyona uğradığı ancak kırılmadığı gözlenmiştir. 0°/90° yönündeki ortalama deformasyonlar ise en düşük seviyededir.

Değişken plaka kalınlığının sebepleri

Plaka kalınlığını en fazla etkiyen parametrelerin anlaşılabilmesi için Pearson korelasyon analizleri yapılmıştır (Tablo 4). Analize dâhil edilen bütün parametrelerinin (VF, NIP, CP, IP, MT) belirli bir oranda plaka kalınlığını etkilediği (**) görülmektedir. Korelasyon katsayılarının değerlerine bakarak ST üzerinde diğer parametrelerin etkileme oranlarını, katsayıların önündeki işarete bakarak hangi yönde (pozitif veya negatif) etkiledikleri anlaşılabilir. Tablo 4'de görüldüğü gibi, ST üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla; -VF, -CP, +IP, -NIP ve -MT olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Parametreler arasındaki korelasyon katsayıları

Parametreler	**ST (mm)**	**VF (%)**	**NIP (adet)**	**CP (kPa)**	**IP (bar)**	**MT (°C)**
ST (mm)	1	-0.545**	-0.325**	-0.428**	0.388**	-0.241**
VF (%)	-0.545**	1	0.554**	0.758**	-0.654**	0.428**

***Pearson korelasyonu P<0.01 düzeyinde ve * P<0.05 düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü). ST (mm): plaka kalınlığı, VF (%): fiber hacmi, NIP (adet): enjeksiyon noktası sayısı, CP (kPa): kürleme basıncı, IP (bar): enjeksiyon basıncı, MT (°C): kalıp sıcaklığı, DEG (°): fiber yönü.*

Değişken plaka kalınlığının proses ve malzeme parametreleriyle ilişkisi

Plaka kalınlıkları ile malzeme parametreleri arasındaki Stepwise çoklu regresyon sonucuna göre; plaka kalınlığı denklemi;

$$ST = -0.074\ VF + 5.919 \quad (1)$$

şeklinde elde edilmiştir. Görüldüğü gibi plaka kalınlığının fiber hacmi (VF) ile ters orantıda ilişkili olduğu görülmektedir. Ancak, Tablo 4'de görüldüğü gibi fiber hacminin de proses parametrelerinden kürleme basıncı (CP) ile doğru (+0.758**) orantıda, enjeksiyon basıncıyla (IP) ise ters (-0.654**) orantıda olmak üzere "yüksek düzeyde ilişkili" olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, plaka kalınlığının proses parametrelerinden -CP ve +IP ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunu kanıtlamak için, plaka kalınlıkları ile sadece proses parametreleri arasında Stepwise çoklu regresyon analizi yapıldığında; plaka kalınlığı denklemi;

$$ST = 9.653 - 0.052\ CP + 0.045\ IP \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Tablo 4'e göre plaka kalınlıkları, analize dahil edilen dört proses parametresiyle de P<0.01 düzeyinde ilişkili olmasına rağmen, enjeksiyon noktası sayısı (-NIP) ve kalıp sıcaklığı (-MT) ile daha zayıf ilişkidedir. Dolayısıyla, analiz sonucu elde edilen 2 nolu regresyon denkleminde de bu iki parametre

yer almamıştır. Ancak, enjeksiyon noktasının 1'den 2'ye çıkmasıyla, cam-dokumalar içindeki hava boşluklarının hızlıca uzaklaştırılıp iyi ıslandığı anlaşılmıştır. Dolayısıyla genel olarak, enjeksiyon noktası sayısının (↑) artması plaka kalınlığını (↓) düşürmüştür. Benzer şekilde, kalıp sıcaklığının (↑) artması da plaka kalınlığını (↓) düşürmüştür. Diğer taraftan yine 2 nolu denklemden anlaşılacağı üzere plaka kalınlığı; kürleme basıncı (-CP) ile ters orantıda orta düzey (-0.428**), enjeksiyon basıncıyla (+IP) ise doğru orantıda zayıf düzey (+0.388**) ilişkili olduğu görülmektedir. Yani, kürlenme basıncı (↑) arttıkça, plaka kalınlığı (↓) azalmakta; enjeksiyon basıncı (↑) arttıkça, plaka kalınlığı da (↑) artmaktadır. Bu durumda "kürleme basıncı, plaka kalınlığı üzerinde enjeksiyon basıncından daha etkili bir parametredir" denilebilir.

Proses ve malzeme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi

Korelasyon analizlerine göre, bütün eğilme özelliklerinin (UFS, FM ve FS), ST ve DEG ile oldukça ilişkili (P<0.01) olduğu; VF, NIP ve IP (*FS hariç) ile ilişkisiz (P≥0.05) olduğu görülmektedir (Tablo 5). Tablo 6'daki çoklu regresyon sonuçlarına göre ise; UFS üzerinde ST ve DEG'in ters orantıda; benzer şekilde FM üzerinde ST ve DEG'in yine ters orantıda; FS üzerinde ise DEG'in doğru orantıda etkili (P<0.01) olduğu tespit edilmiştir. FS sadece +DEG ilişkili olup, ST ile önemli oranda arasında ilişkili yoktur (Tablo 5 ve 6).

Tablo 5. Eğilme özellikleri ile parametreler arasındaki korelasyon katsayıları

Mekanik özellikler	**Parametreler**						
	ST (mm)	VF (%)	NIP (adet)	CP (kPa)	IP (bar)	MT (°C)	DEG (°)
Eğilme mukavemeti, UFS (MPa)	-0.391**	0.036	0.119	0.115	-0.118	0.066	-0.897**
Eğilme modülü, FM (MPa)	-0.433**	0.058	0.034	0.057	-0.024	-0.035	-0.898**
Eğilme straini, FS (%)	0.195**	0.038	0.087	0.136	-0.153*	0.079	0.670**

***Pearson korelasyonu P<0.01 düzeyinde ve * P<0.05 düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü). ST (mm): plaka kalınlığı, VF (%): fiber hacmi, NIP (adet): enjeksiyon noktası sayısı, CP (kPa): kürleme basıncı, IP (bar): enjeksiyon basıncı, MT (°C): kalıp sıcaklığı, DEG (°): fiber yönü.*

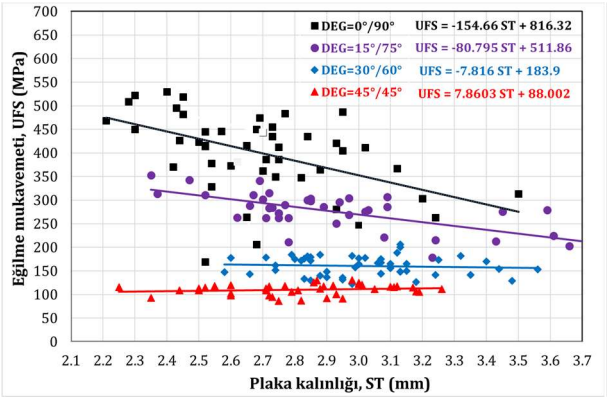
Tablo 6. Eğilme özellikleri ile proses parametreleri için Stepwise çoklu regresyon sonuçları

Eğilme özellikleri	**Regresyon denklemleri ***	**df**
UFS (MPa)	UFS = 642.6 – 88.38 ST – 6.66 DEG	2, 180
FM (MPa)	FM = 26485 – 3816 ST – 236 DEG	2, 180
FS (%)	FS = 3.13 + 0.04 DEG	1, 180

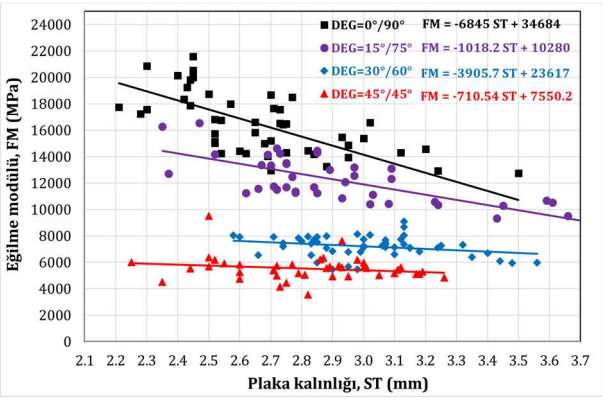
** Regresyon denklemleri birkaç uç değer çıkarılarak elde edilmiştir ve P<0.01 düzeyinde anlamlıdır.*

Eğilme özelliklerinin plaka kalınlığı ile değişimi

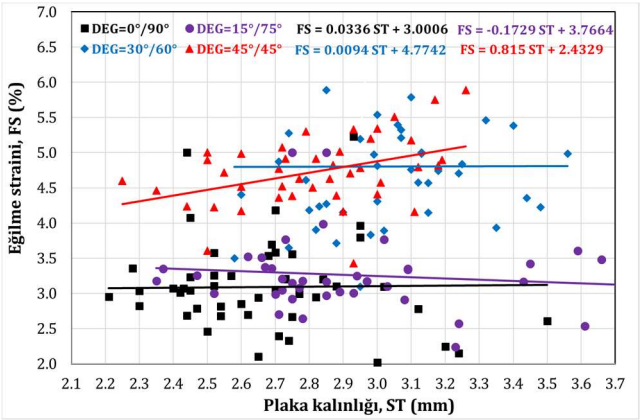
Şekil 5'de görüldüğü gibi ST'nin (↑) artması ile UFS, bütün fiber yönlerinde ters orantıda (↓) değişmektedir. Ancak fiber yönünün 45°/45° olduğu durumda; ST'nin (↑) artmasıyla UFS de (↑) artmıştır. ST - UFS ilişkisine benzer şekilde, Şekil 6'da görüldüğü gibi ST'nin (↑) artması ile bütün fiber yönlerinde FM, ters orantıda (↓) değişmektedir. Şekil 7'ye dikkat edilirse, ST ile FS arasında 15°/75° yönünde negatif, diğer yönlerde ise pozitif ama zayıf ilişki mevcuttur. Fiber yönü 45°/45° ise; ST'nin (↑) artmasıyla FS (↑) daha belirgin artmıştır. Diğer yönlere kıyasla; 30°/60° ve 45°/45° yöndeki numune deformasyonlarının bariz şekilde daha yüksek (↑) olduğu net şekilde görülmektedir.



Şekil 5. Plaka kalınlığı – eğilme mukavemeti ilişkisi



Şekil 6. Plaka kalınlığı – eğilme modülü ilişkisi



Şekil 7. Plaka kalınlığı – eğilme straini ilişkisi

IV. TARTIŞMA

Minimum ve maksimum kalınlığa sahip iki plakanın özelliklerini karşılaştırdığımızda parametrelerin etkisi daha net anlaşılabilir. Örneğin 1-nolu plakada nominal kalınlık 2.63±0.25 mm iken 10-nolu plakada 3.21±0.37 mm'dir. Bu nedenle 1-nolu plaka için fiber hacim oranı %44.31, kürleme basıncı 136 kPa, enjeksiyon basıncı 2.39 bar ve kalıp sıcaklığı 45 °C'dir. 10-nolu plakanın fiber hacim oranı ise %37.22, kürleme basıncı 130 kPa, enjeksiyon basıncı 5.08 bar ve kalıp sıcaklığı ise 40 °C'dir. Bu karşılaştırmadaki veriler, Tablo 4'deki parametreler arasındaki korelasyonlar ile uyuşmaktadır ve plaka kalınlığı ile proses parametreleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Kompozit plakalarda mukavemet ve modül, normalde fiber miktarıyla ilişkilidir [26]. Ancak, bu çalışmada görüldü ki, mekanik özellikler fiber miktarı ile kıyaslandığında plaka kalınlığı ile daha fazla ilgilidir (Tablo 5). Bazen bu durum sonuçların yorumlanmasında bazı sorunlara da yol açabilmektedir. Kalın bir numune ince bir numuneden ağırlıkça daha fazla fiber içermez. Ancak, ince numune hacim olarak daha fazla fiber içerir (Tablo 2). Bu nedenle 1 ve 10-nolu plakalardaki gibi kalın numunelerin nihai kırılma kuvveti, ince numunelerden daha yüksek olsa bile (Şekil 4), kalın numune daha düşük nihai dayanım ve rijitliğe sahip olacaktır. Bu nedenle kompozit plakalarda kesit etkisi dikkate alınmazsa, nihai kırılma kuvveti ile bazen modül ve nihai gerilmeler de biraz yanlış yönlendirici olabilir [26]. Ayrıca, plaka kalınlığının artması, kompozit yapıya ekstra ağırlık eklediği gibi ara yüzey kusurlarında da artışa ve delaminasyona yol açabilmektedir [27]. Diğer taraftan enjeksiyon basıncının en düşük seviyede uygulandığı 1, 2 ve 3 nolu plakalarda (Tablo 2), merkezine yakın kalınlıkların dış kenarlara göre daha ince olduğu gözlenmiştir. Bu durum: a) kürleme basıncının daima kalıp merkezinden uygulanmış olması, b) enjeksiyon sırasındaki düşük basınçtan dolayı kalıp merkezinde kalınlığı etkileyecek deformasyonların neredeyse hiç oluşmaması, c) enjeksiyon sürekli olarak kalıp merkezinden uygulandığından merkezdeki cam-dokuma kumaşlar dış kenarlara göre daha iyi ıslanmış olması ile açıklanabilir. Literatürdeki çalışmaları destekler şekilde bu çalışmada da görüldü ki, plaka üretimine ait proses ve malzeme parametreleri ile sıcaklık gibi çalışma ortamına bağlı birçok değişkenin varlığı hem plaka kalınlığı hem de mukavemet üzerinde çoklu seviyede etkili olmaktadır. Dolayısıyla kompozit plakalardaki olumlu/olumsuz değişkenlerin bu çalışmada olduğu gibi istatistiksel olarak analiz edilmesinin mantıklı bir yöntem olduğu sonucuna varılabilir [12].

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, farklı proses parametreleri altında ve farklı kalınlıklarda elde edilen 10 farklı kompozit plakanın 0°/90°, 15°/75°, 30°/60° ve 45°/45° yönlerindeki statik eğme yükü altındaki eğilme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca RTM metoduyla kompozit plaka üretiminde değişken plaka kalınlığının sebepleri ortaya konulmuştur. Gözlenen deneysel davranış ve yapılan analizlere dayanarak, aşağıdaki genel çıkarımlar elde edilmiştir:

- Hem korelasyon hem de çoklu regresyon analizlerinden görüldüğü gibi, teorik olarak plaka kalınlığını değiştiren en önemli malzeme parametresi fiber hacmidir.
- Plaka kalınlığını, enjeksiyon ve kürleme basıncı gibi proses parametreleri birinci dereceden direkt etkilemiştir. Enjeksiyon basıncı (↑) arttıkça üst kalıp yüzeyinin yukarı yönde hafifçe esnemesinden dolayı, kalıp boşluğunun hacminde ve plaka kalınlığında (↑) artış olduğu gözlenmiştir. Kürleme basıncının (↑) artması ise bariz şekilde plaka kalınlığını (↓) düşürmüştür.
- Plaka kalınlığının (↑) artması, fiber hacmi (↓), eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü (↓) düşürmekte, eğilme deformasyonunu ise (↑) arttırmaktadır.

TEŞEKKÜR

Katkılarından dolayı Makine Mühendisi Mehmet Gülnar'a teşekkürler.

KAYNAKLAR

[1] Andrew OP, Echiye OG. "Applications of Composite Materials in the Development of Aerospace Industry". *J. Eng. Appl. Sci. Res*, 8(1), 75-85, (2016).
[2] Oladele IO, Omotosho TF, Adediran AA. "Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications". *International Journal of Polymer Science*, 2020(1-12, (2020).
[3] Patel JS, Boddu VM, Brenner MW, Kumar A. "Effect of fabric structure and polymer matrix on flexural strength, interlaminar shear stress, and energy dissipation of glass fiber-reinforced polymer composites". *Textile Research Journal*, 86(2), 127-137, (2016).
[4] Basavarajappa S, Arun K, Davim JP. "Effect of filler materials on dry sliding wear behavior of polymer matrix composites–a Taguchi approach". *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, 8(05), 79-391, (2009).
[5] Azadi R, Rostamiyan Y. "Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization". *Construction and Building Materials*, 88(0), 212-224, (2015).
[6] Ayatollahi S. Effect of process parameters on the mechanical properties of carbon fiber epoxy composites by wet compression molding, The University of Western Ontario, Electronic Thesis and Dissertation Repository (9144), Ontario, Canada, 2023.
[7] Pradeep S, Kumar MS. "Effect of width and thickness on Flexural Strength of E-glass Vinyl Ester (+45°/-45°) Composite". *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, 1(1), 85-92, (2013).
[8] Fan J, Njuguna J, An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures, in *Lightweight Composite Structures in Transport*. 2016, Elsevier. p. 3-34.
[9] Kumar AK, Laxmaiah G, Babu PR. "Process Parameters Optimization And Characterization Of RTM Manufacturing Process For High Performance Composites". *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(8), 400-412, (2022).
[10] Lee CL, Wei KH. "Resin transfer molding (RTM) process of a high performance epoxy resin. II: Effects of process variables on the physical, static and dynamic mechanical behavior". *Polymer Engineering & Science*, 40(4), 935-943, (2000).
[11] Lee CL, Wei KH. "Effect of material and process variables on the performance of resin-transfer-molded epoxy fabric composites". *Journal of Applied Polymer Science*, 77(10), 2149-2155, (2000).
[12] Wisnom MR. "The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy". *Composite Structures*, 18(1), 47-63, (1991).
[13] Fortin-Simpson J. Effect of Thickness and Ply Orientation on the Flexural Bending Behaviour of Thick Composite Laminates. 2019. Concordia University.
[14] Babukiran B, Harish G. "Influence of resin and thickness of laminate on flexural properties of laminated composites". *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3(1), (2014).
[15] Kumar MS, Krishna SG, Rajanna S. "Study on effect of thickness and fibre orientation on a tensile and flexural properties of a hybrid composite". *Int J Eng Res Appl*, 4(8), 56-66, (2014).
[16] Liu H, Ma X, Jiang L, Sang L, Hou W, Zhang Z, Wu H. "Effect of ply thickness on tensile and bending performances of carbon fiber reinforced thermoplastic unidirectional laminate". *Polymer Composites*, 44(3), 1889-1901, (2023).
[17] Akbulut M, Sonmez FO. "Optimum design of composite laminates for minimum thickness". *Computers & Structures*, 86(21-22), 1974-1982, (2008).
[18] Biswas S, Anurag J. "Fabrication of composite laminates". *Reinforced polymer composites: processing, characterization and post life cycle assessment*, 39-53, (2019).
[19] Bhat R, Mohan N, Sharma S, Pratap A, Keni AP, Sodani D. "Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites". *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), 3653-3661, (2019).
[20] Hu Y, Han G, Cheng F, Hu X. "Thickness effect on flexural strengths of laminar carbon fibre composites". *Thin-Walled Structures*, 186(110690, (2023).
[21] Mohammadi H, Ahmad Z, Mazlan SA, Faizal Johari MA, Siebert G, Petrů M, Rahimian Koloor SS. "Lightweight Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite for Automotive Bumper Applications: A Review". *Polymers*, 15(1), 193, (2022).
[22] Lee J-M, Lee K-H, Kim B-M, Ko D-C. "Design of roof panel with required bending stiffness using CFRP laminates". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(479-485, (2016).
[23] Kaynak C, Kas YO. "Effects of injection pressure in resin transfer moulding (RTM) of woven carbon fibre/epoxy composites". *Polymers and Polymer Composites*, 14(1), 55-64, (2006).
[24] ASTM-D7264/D7264M, "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Pennsylvania 19428-2959, USA, 2007.
[25] George D, Mallery P, *SPSS for windows step by step: A simple study guide and reference*, 17th ed., New York: Allyn & Bacon, (2010).
[26] Kuttenkeuler J, Grenestedt J. Influence of process parameters on mechanical behavior of RTM moldings. *Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials*: *Whistler*, Woodhead Publishing, British Columbia, Canada, 14-18 August 1995.
[27] Naresh K, Alia RA, Cantwell WJ, Umer R, Khan KA. "Influence of face sheet thickness on flexural strength characteristics of carbon/epoxy/Nomex honeycomb sandwich panels". *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 25(5), 537-554, (2023).

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Elektrikli Araç Kablosuz Şarj Sistemleri İçin Kartezyen Robot Tasarımı

Kaan Karaoğlu[1], Raif Bayır[2*]

[1] Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0009-0004-1862-3115)
[2] Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3155-8771)

[*]**Sorumlu Yazar**: rbayir@karabuk.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, elektrikli araçların kablosuz olarak şarj edilebilmesinde performans ve verimliliğin arttırılması için kartezyen robot geliştirilmiştir. Kartezyen robot her biri doğrusal hareket yapan üç eksene sahiptir. Kartezyen robot verici şarj pedinin hizalanmasında manyetik konumlama yapılmıştır. Elektrikli araçların şarjında statik ve dinamik olmak üzere iki farklı yapıdaki kablosuz şarj yöntemi bulunmaktadır. Elektrikli araçtan kablosuz olarak güncel şarj bilgisi (SOC State of Charge) ve konum bilgisi alınmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda aktarılacak güç belirlenerek, maksimum verim için alıcı ve verici şarj pedleri hizalanmaktadır. Bu çalışma ile tam otomatik bir kartezyen robot yapısı ile elektrikli araçların mümkün olan en yüksek verim ile şarj edilmesini sağlanacaktır. Elektrikli araç ve şarj istasyonu arasında kurulan kablosuz haberleşme ile şarj durumu gerçek zamanlı olarak izlenecektir. Bu çalışmada geliştirilen kartezyen robot statik kablosuz şarj sistemlerinde rahatlıkla kullanılabilecek araç - makine haberleşmesi yapabilen, tam otomatik sistem olma niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, kablosuz şarj sistemleri, enerji verimliliği, kartezyen robot, konum algılama, yörünge planlanması.

Design of Cartesian Robot For Electric Vehicle Wireless Charging Systems

ABSTRACT

In this study, a Cartesian robot is developed to improve the performance and efficiency of wireless charging of electric vehicles. The Cartesian robot has three axes, each of which moves linearly. Magnetic positioning is used to align the Cartesian robot transmitter charging pad. There are two different wireless charging methods, static and dynamic, for charging electric vehicles. Current state of charge information (SOC State of Charge) and location information are received wirelessly from the electric vehicle. Based on this information, the power to be transmitted is determined and the transmitter and receiver charging pads are aligned for maximum efficiency. With this study, a fully automated Cartesian robot structure will be used to charge electric vehicles with the highest possible efficiency. With the wireless communication established between the electric vehicle and the charging station, the charging status will be monitored in real time. The Cartesian robot developed in this study is a fully automatic system that can be easily used in static wireless charging systems with vehicle-machine communication.

Keywords: Electric vehicle, wireless charging systems, energy effiency, cartesian robot, location detection, trajectory planning.

1. Giriş

Elektrikli araç teknolojileri artan ihtiyaçlar doğrultusunda her geçen gün ilerlemekte ve gelişmektedir. Bu bağlamda farklı ihtiyaçlar ve farklı temel tasarım ilkeleri doğrultusunda çeşitli elektrikli araç teknolojileri üretilmektedir. Elektrikli araçlar enerji kaynağı olarak elektriğin kullanım derecesine göre üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar elektrikli, hibrit ve plug-in hibrit şeklindedir. Günümüz ve geleceğin ulaşım teknolojileri arasında en üst sırada yer alan elektrikli araçlar için şarj sistemleri oldukça önemlidir. Elektrikli araçlar için şarj yöntemleri batarya değiştirme, kablolu şarj ve kablosuz şarj olmak üzere 3 ana başlıkta incelenir [1]. Bu yöntemler içerisinde otonom olarak çalışabilmesi, soket ve bağlantılarda yıpranmaya sebep olmaması

ve elektriksel arızaların minimuma indirilebilmesinden kaynaklı olarak endüktif şarj olarak da bilinen kablosuz şarj sistemleri dikkat çekmektedir[2]. Pek çok uzman gelecekte kablosuz veya endüktif şarjın bir boşluk üzerinden güç aktarımı ile tak çalıştır sistemlere göre daha popüler olacağına inanmaktadır [3]. Elektrikli araçlarda kablosuz şarj sistemleri dinamik kablosuz şarj ve statik kablosuz şarj olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Statik kablosuz şarj yöntemi, sabit şarj yöntemi olarak da bilinmektedir. Şebeke gücünden yerleşik batarya girişine kadar ölçülen statik şarj cihazının sistem verimliliği %85-93 arasında değişmektedir[4]. Dinamik kablosuz şarj yöntemi ise hareket halindeki elektrikli araçları şarj etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem elektrikli araçlardaki menzil ve maliyet ile ilgili bazı sorunları azaltabilecek bir teknolojidir[5].

Genel olarak kablosuz bir şarj sistemi oluşturulurken, makul bir verimlilik yakalayabilmek için (>%80) en fazla 10 cm'lik bir yanlış hizalama yapılacağına dayanılır. Ancak yapılan araştırmalar, herhangi bir harici park navigasyon desteği almayan sürücülerin park ederken boylamasına ortalama olarak 70 cm'den fazla yanlış hizalama yaptığını göstermektedir[6]. Ayrıca sürücülerin yalnızca %5'i araçlarını ek yardım almadan kabul edilen yanlış hizalama sınırları içerisine park edebilmektedir. Genel olarak, verimli bir şarj için sürücünün park etmesine rehberlik etmek üzere bobin konumlandırma bilgisi sağlayan bir araç hizalama sistemi oldukça arzu edilen bir sistemdir. Kablosuz elektrikli araç şarjı için araç hizalama teknolojisi, esas olarak manyetik ve radyo konumlandırma yaklaşımlarına odaklanmıştır [7].

Mecke ve arkadaşları tarafından yürütülen araştırmalara dayanarak, elektrikli otomobilleri şarj etmek için uygun güç aktarımlarının büyük hava boşluklarında yüksek verimlilikle elde edilebileceğini gösterdi. Yaklaşık %80 oranında bir genel verimlilik elde edildi[8]. Benzer geliştirme araştırmaları, bu dönemde, ferrit kuplörlerin tasarımını optimize etmek için Sojo Üniversitesi'nde [9] ve Auckland Üniversitesi'nde [10] yürütülmektedir. Bu, 2000'lerin sonlarında tartışılan ve yüksek düzeyde verimlilik ve iyi tolerans ile sergilenen çeşitli sistemlerle sonuçlandı. Mecke ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmaya en çok benzeyen sistem, EVS (Electric Vehicle Symposium) 2009'da Stavanger'da sergilendi. Bu Auckland sistemi mütevazı bir 20 kHz'de çalışırken, 220 mm'lik açıklıklar üzerinden 2 kW'lık güç aktarılabilirken, aynı zamanda ±150 mm'ye kadar yanal toleranslara izin verilmiştir. Tüm sistemin verimliliği (tüm güç elektroniği dahil) %85'in üzerindedir ve manyetik bobin kaybı nispeten geniş bir alana yayılmış, her bobinde sadece %2-3 olarak ölçülmüştür.

Virginia Tech'de yapılan araştırmada hava boşluğu ve yanal mesafe değişikliği altında kaplini korumak için asimetrik bir kuplör tasarlanmıştır. 8 cm hava boşluklu transformatör ve 156 kHz anahtarlama frekansına sahip 4 kW prototip ile %96,6'lık bir tepe verim elde edilmiştir [11]. Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan çalışmada güç aktarım kapasitesi, verimliliği, yanal tolerans, elektromanyetik alan, hava boşluğu, boyut, ağırlık ve kablosuz güç aktarım sistemlerinin maliyeti gibi konularda iyileştirme sağlamak için araç hareket halindeyken yola gömülü endüktif güç aktarımı (IPT – Inductive Power Transfer) rayları vasıtasıyla elektrikle beslenen çevrimiçi bir elektrikli araç kablosuz şarj sistemi yapılmıştır. Bu sistem 20 kHz'de 60 kW elektriği 20 cm hava boşluğu ile 24 cm yanal toleransla iletmede %83 verimliliğe sahiptir[12].

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde (İTÜ) hazırlanan çalışmada yüksek verim ve kuplaj sağlanacak şekilde bir kablosuz şarj sisteminin tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin farklı hizalama hatalarında verim analizi yapılmış ve bağlantı katsayısındaki değişim incelenmiştir. Tasarlanan sistem ile 200mm hava aralığında tam hizalı durumda yaklaşık 3.3 kW'lık güç yer grubu tarafından araç grubu tarafına %94,95 verimle aktarılmıştır [13].

British Columbia Üniversitesi kapsamında hazırlanan çalışmada düşük frekans kullanan kalıcı mıknatıslı kaplinde yüksek verimli kablosuz güç iletimi konu alınmıştır. Geliştirilen sistem geleneksel rezonans endüktif güç aktarım cihazlarına göre çok daha düşük çalışma frekansına sahiptir. İki farklı yöntem kullanılarak inşa edilmiştir. Bunlardan ilki manyetik akıyı arttırarak ve azaltarak sargı faktörünü arttırmayı içerir. İkinci yöntem ise sargılardaki girdap akımı kayıplarını azaltmayı içermektedir. Bu çalışma 15 cm ayrılma mesafesine ve 1,6 kW güç aktarım seviyesine sahiptir. Ölçeklendirmesi küçük olan çalışma ise daha çok tıbbi implantları hedef uygulama alanı olarak belirlemiştir. 10 cm ayırma mesafesine ve 60 W güç aktarımına sahiptir. Her iki ölçekteki çalışmada yaklaşık %81 verim sağlamış ve 150 Hz bandını geçmemiştir [14].

Elektrikli araçlar için pratik bir kablosuz şarj sistemi, yer grubu tarafında bir doğrultucu ve bir invertör, bir manyetik kuplör, bir doğrultucu ve araç üzerinde bir doğrultucu ve dc-dc dönüştürücülerden oluşur [15]. Araç grubu tarafında ise batarya, akım ve gerilim sensörleri yer almaktadır. Kablosuz elektrikli araç şarjıyla ilgili mevcut araştırma endişeleri, öncelikle manyetik bağlayıcı tasarımı, devre topolojileri, yüksek frekanslı güç dönüşümü ve şarj kontrol stratejileri ve algoritmalarını içerir [16]-[17]. Elektrikli araç şarj sistemlerinde kablosuz güç aktarımının iki etkili yöntemi olan kapasitif güç aktarımı (CPT – Capacitive Power Transfer) ve endüktif güç aktarımı üzerinde durulmaktadır [17]. İzmir Ege Üniversitesi kapsamında geliştirilen çalışmada endüktif kuplajlı kablosuz enerji transferi tasarımına odaklanılmış ve aktarılan güç verimliliği %64,2 olarak ölçülmüştür [18]. Zhejiang Üniversitesi kapsamında gerçekleştirilen "Kablosuz Elektrikli Araç Şarjı için Yakın Alan İletişimi ile Entegre Çalışması" isimli çalışma, kablosuz elektrikli araç şarjının ticarileştirilmesi adına çözülmesi gereken üç kritik soruna yanıt aramıştır. Bu sorunlar araç grubu ve yer grubu arasındaki iletişim, yer grubu bobininde metal nesne algılama (MOD – Metal Object Detection) ve araç grubunda konum algılama (PD – Position Detection) şeklindedir[19]. Ayrıca daha ileri çalışmalara konu olabilecek araçtan şebekeye (V2G – Vehicle to Grid) olan yöntem ile şebeke ve elektrikli araç şarj sistemi arasında dalgalanmaların azaltılması, voltaj piklerinin engellenmesi enerji fiyatlarının düşük olduğu zamanlarda bataryaların enerji depolaması ve yüksek olduğu anlarda şebekeye geri verilmesi ile maliyetlerin azaltılması mümkündür[20].

Bu çalışmada ortaya çıkan kartezyen robot sistemi tam otonom yapısıyla, elektrikli araçları insan uğraşına gerek kalmaksızın

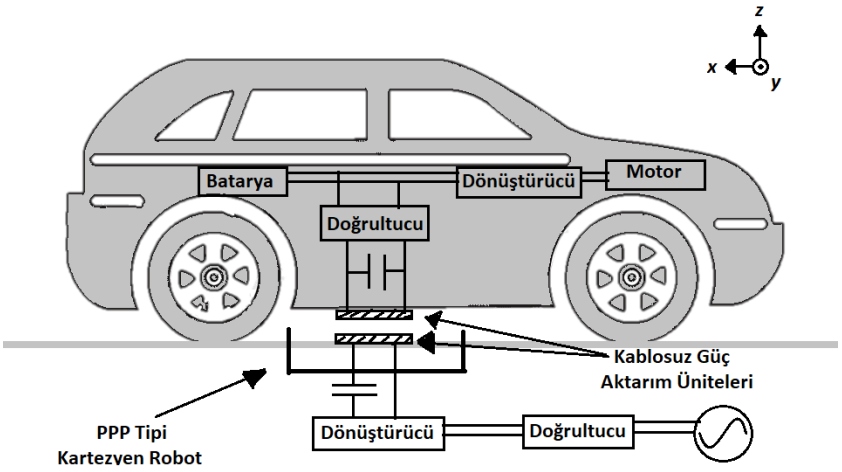
şarj edebilmektedir. Bu durum insan gücünden tasarruf sağladığı gibi aynı zamanda kablolu şarj bağlantılarında sıklıkla yaşanan soket ve diğer bağlantı elemanlarının arızaları gibi problemlerin de önüne geçecektir. Kartezyen robot yer altında çalışacağından alan tasarrufu sağlamaktadır. Kartezyen robot L7 Sınıfı olarak da bilinen hafif dört tekerlekli araç kategorisi göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Sistem üzerinde yapılacak düzenlemeler ile farklı araç sınıfları için de üretilebilirliği söz konusudur. Kartezyen robot sistemi araç sirkülasyonunun yoğun olduğu ve insanların araç dışında zaman geçirdikleri iş yerleri, alışveriş merkezleri ya da resmî kurumların otopark alanları gibi alanlarda kullanıma uygun olacak şekilde tasarlanmıştır.

2. Kablosuz Şarj Sistemleri

Kablosuz şarj olarak da bilinen endüktif şarj, elektrikli araç bataryasına güç aktarmak için elektromanyetik dalgalar kullanmaktadır [4]. Kablosuz batarya şarjı elektrikli araç sürücüleri için geleneksel kablolu bağlantılardan daha uygun bir çözümdür. Sürücü otomobili şarj yuvasına park ettiğinde şarj işlemi kendiliğinden otomatik olarak başlar. Bu sayede fişler, prizler, yıpranmış-kirli kablolar, araçlardan sarkan kablolar nedeniyle oluşan riskler ortadan kaldırılmış olmaktadır. Bu ve benzeri avantajlar sayesinde temassız endüktif şarj geleneksel kablo bağlantılı şarj sitemlerine iyi bir alternatiftir. Tüm yeni elektrikli araçlar tak-çalıştır şarj olarak tasarlanmasına rağmen, birçok uzman gelecekte kablosuz veya endüktif şarjın bir boşluk üzerinden güç aktarımı ile tak çalıştır sistemlere göre daha popüler olacağını düşünmektedir. Bir endüktif şarj sistemi manyetik olarak güç aktarır. Tavsiye edilen uygulama endüktif şarja EA için 1995'te Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE – Society of Automotive Engineers) tarafından yayınlanmıştır. Avantajları kolaylık ve elektriksel yalıtım içermesidir. Dezavantajları ise nispeten düşük verimlilik ve güç üretim karmaşıklığı, boyutu ve yeni altyapı maliyetidir[21]. Kablosuz şarj sistemleri dinamik ve statik olmak üzere iki alt başlıkta incelenmektedir. Elektrikli araçlar için dinamik kablosuz şarj, araç hareket halindeyken aracın şarj edilmesini hedef alan bir yöntemdir. Elektrikli araçlarda statik kablosuz şarj yöntemi ise araç hareketsiz şekilde park halinde iken aracın şarj edilmesini konu alır.

A. Statik Kablosuz Şarj Yöntemi

Bu yöntem sabit şarj yöntemi olarak da bilinmektedir. Şebeke gücünden yerleşik batarya girişine kadar ölçülen statik şarj cihazının sistem verimliliği %85-93 arasında değişmektedir. Fakat hava aralığının olduğu deneysel prototip sistemleri için verimlilik %95-98 olarak gözlenmiştir. Birincil bobin, güç dönüştürücüleri ile zeminin altına monte edilmektedir. Alıcı bobin veya ikincil bobin normalde Elektrikli araçların ön, arka veya ortasının altına monte edilmektedir. Enerjinin AC-DC dönüşümü güç dönüştürücüler vasıtası ile yapılmaktadır. Ardından bataryaya aktarılmaktadır. Güç kontrolü ve batarya yönetim sistemleri herhangi bir güvenlik sorunundan kaçınmak ve birincil taraftan geri bildirim alabilmek için kablosuz iletişim ağına sahiptir. Şarj süresi şebeke gücüne, batarya boyutlarına ve iki sargı arasındaki hava boşluğu mesafesine bağlıdır. Bu tip bir şarj cihazı ya da istasyonunun otoparklara, evlerin garajlarına, alışveriş merkezlerine vb. alanlara kurulabilmesi mümkündür. Şekil 1'de Elektrikli araçlar için oluşturulmuş kartezyen robot ile hizalama yapılan bir kablosuz şarj sisteminin blok diyagramı verilmektedir.

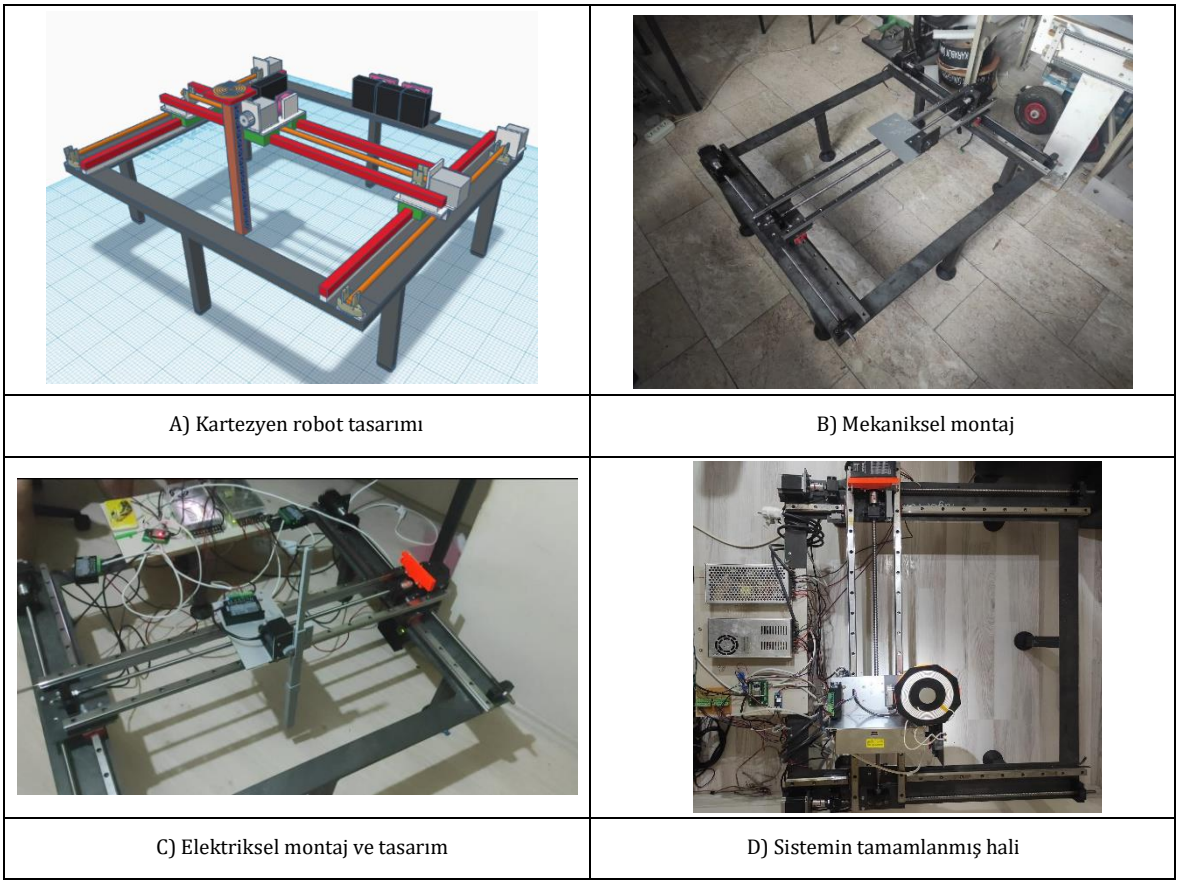


Şekil 1. Elektrikli araç kablosuz şarj sistemi blok diyagramı.

3. Elektrikli Araç Kablosuz şarj sistemi Kartezyen Robot Tasarımı

Kartezyen robot, üç ekseni de doğrusal olarak hareket eden eksenleri birbirine dik açılarla yerleştirilmiş robotlardır. Öteleme hareketi yapan üç eklemi ile uç işlevcisini 3 boyutlu uzayda çalışma alanın içerisinde istenilen konuma götürmektedir. Kartezyen robotlar çalışma alanlarının üzerinde çalıştıkları için büyük oranda zemin alanı tasarrufu sağlamaktadır.

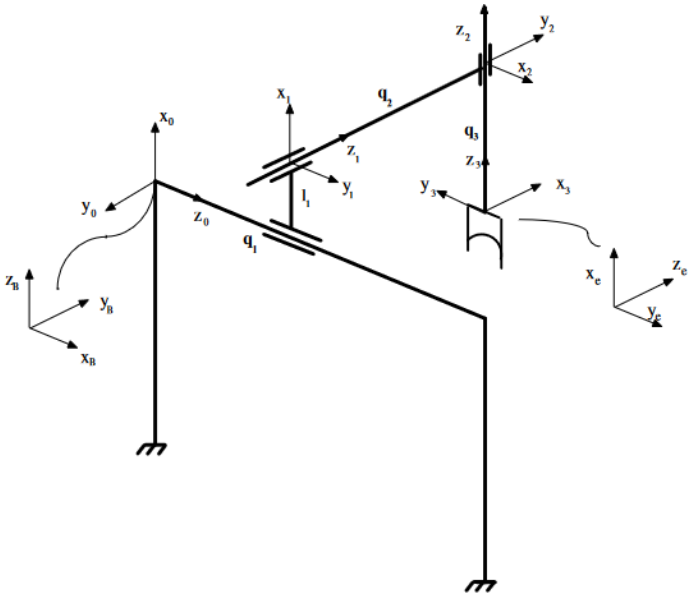
Çalışmada PPP tipi kartezyen robot kinematik yapısı tercih edilmiştir. Kartezyen robot platformu kinematik denklemle uygun bir şekilde geliştirilmiştir. Tasarımdan son hale kadar olan kartezyen robot platformu Şekil 2'de verilmektedir. Burada A) kartezyen robotun tasarım aşamasındaki 3 boyutlu görselini, B) tasarlanan kartezyen robotun mekanik bileşenlerinin montajlanma aşamasını, C) robotun hareket, haberleşme ve güç aktarımı gibi organlarını sağlayan elektriksel montajını ve D) sistemin tamamlanmış halini göstermektedir.



A) Kartezyen robot tasarımı | B) Mekaniksel montaj

C) Elektriksel montaj ve tasarım | D) Sistemin tamamlanmış hali

Şekil 2. Geliştirilen kartezyen robotun tasarım resmi ve gerçekleştirme fotoğrafları



Şekil 3. Kartezyen robotun kinematik analizi.[22]

Kartezyen robotun kinematik analizi yapılırken Şekil 3 de verilen basit çizim üzerinden Denavit – Hartenberg gösterimi (Tablo 1) esas alınarak her bir eksen için hareket matrisleri elde dilmiştir.

Tablo 1. Kartezyen robot D-H parametreleri

Eklem	**ai**	**αi**	**di**	**θi**
1	I_1	$\pi/2$	d_1 = 55 cm	0
2	0	$\pi/2$	d_2 = 55 cm	$\pi/2$
3	I_e	0	d_3 = 15 cm	$\pi/2$

Kartezyen robotun doğrusal hareket yapan her bir ekseni için kinematik dönüşüm matrisleri Eşitlik 3.1 verilmektedir [22].

$$A0=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\ A1=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & d_1 & 0 & d_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\ A2=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\ A3=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & -d_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\ A4=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (3.1)$$

T03 Transformasyon matrisi Eşitlik 3.2. de görüldüğü gibi oluşmaktadır[22].

$$Tbe = A0.A1.A2.A3.A4 = Tb0.T01.T12.T23.T3e \quad (3.2)$$

Kartezyen robot dönme hareketi yapmadığından x, y ve z eksenlerindeki öteleme hareketleri dikkate alınarak T03 dönüşüm matrisi hesaplanır(Eşitlik 3.3) [22].

$$T_b^e=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & d_1\\ 0 & 0 & 1 & d_2\\ 1 & 0 & 0 & -d_3+l_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Robotun x, y ve z eksenlerinde verilen konuma gitmesi için d1, d2 ve d3 de alınan yol ters kinematik analiz ile bulunabilir. Ters kinematik analizde, ileri kinematikte bulunan dönüşüm matrisleri Eşitlik 3.4 verildiği gibi eşitlenir[22].

$$[Tb0]\text{-}1.\ Tbe = T01.\ T12.T23.T3e \quad (3.4)$$

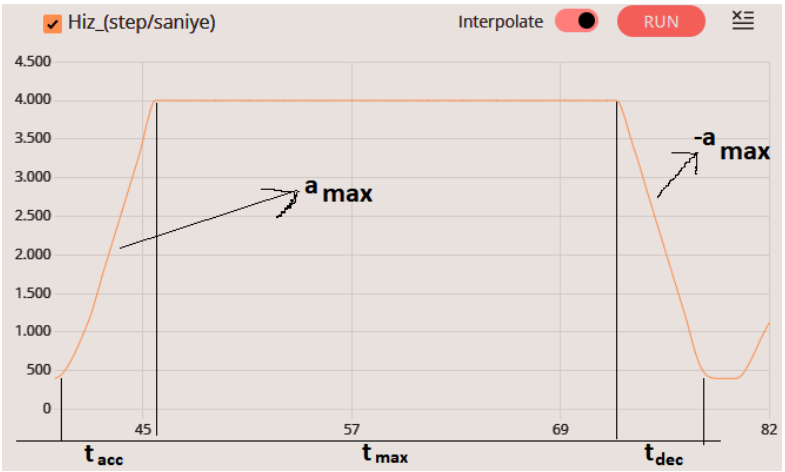
Eşitlik 3.4'ün sol ve sağ tarafındaki ifadeler çözümlenir.

$$[T01]\text{-}1.\ Tbe=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x\\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y\\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$T0e=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1 & d_2+d_3\\ 0 & 0 & -1 & -d_2\\ 0 & d_1 & 0 & d_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dots & \dots & p_z\\ \dots & \dots & -p_y\\ \dots & \dots & p_x\\ \dots & \dots & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dots & \dots & \dots & d_2+d_3\\ \dots & \dots & \dots & -d_2\\ \dots & \dots & \dots & d_1\\ \dots & \dots & \dots & 1\end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Eşitliğin çözümü sonucunda kartezyen robot üç doğrusal ekleme sahip olduğu için tek çözüm kümesi ortaya çıkmaktadır (Eşitlik 3.5). Kartezyen robotun her bir ekseninde zamana bağlı hız bilgisinin gözlemlenmesi için interpolasyonlu hareket denklemlerinden faydalanılmış ve trapezoidal hız profili elde edilmiştir.



Şekil 4. Trapezoidal hız profili.

İnterpolasyonlu hareketin hesaplanması ve istenen grafiğin oluşturulması için gerekli olan denklemler Eşitlik 3.6. – 3.9.'de verilmektedir. [23].

$$tacc = tdec = (wmax/amax) \quad (3.6)$$

$$ttoplam = tacc + tmax + tdec \quad (3.7)$$

$$\theta = \frac{1}{2} tacc \,.\, wmax + tmax \,.\, wmax + \frac{1}{2} tdec \,.\, wmax = wmax \,.\, \left(\frac{tacc}{2} + tmax + \frac{tdec}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$tmax = \frac{|\theta|}{wmax} - \frac{|tacc|}{2} - \frac{|tdec|}{2} \quad (3.9)$$

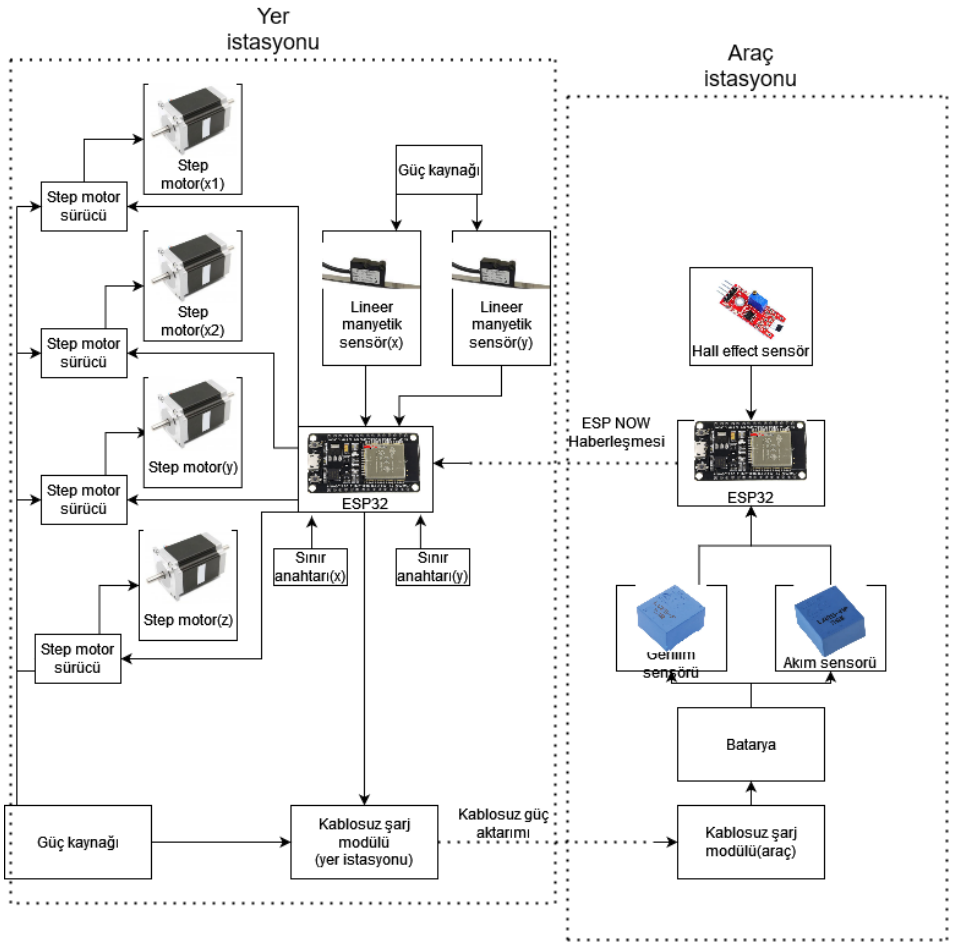
Şekil 4. ve denklem 3.6-3.9 eşitliklerinde wmax maksimum hızı, amax maksimum ivmeyi, tacc pozitif ivmelenme zamanını, tdec negatif ivmelenme zamanını, tmax maksimum hızın gerçekleştiği zamanı ve ttoplam toplam hareket süresini ifade etmektedir. İnterpolasyonlu harekette hızlı eksenlerin yavaşlatılarak en yavaş hareket eden eksen ile eş zamanlı hareketi gerçekleştirilir. Sistemde bulunan üç eksenin hareketini eş zamanlı olarak tamamlayabilmesi için eksenlerin hız ve ivmeleri yeniden düzenlenmiştir. Oluşturulan sistemde bulunan en yavaş eksen fiziki uzunluğundan dolayı Y eksenidir. Hız ve ivme değerleri bu eksene göre düzenlenip istenen hareketin sağlanması için aşağıda bulunan Eşitlik 3.10'daki indirgeme faktörü kullanılmıştır.

$$F = \frac{t_{toplam1} + t_{toplam2} + t_{toplam3}}{t_{toplamenyavas}} \quad (3.10)$$

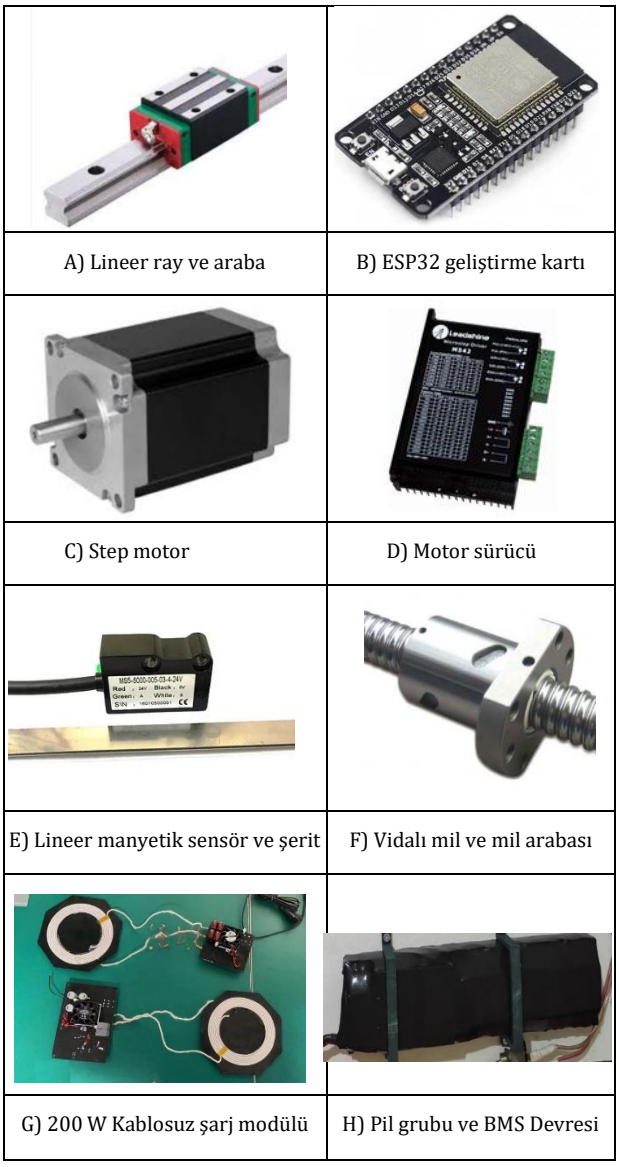
Kartezyen robot ile en uygun noktanın belirlenmesi işlemi, hall effect manyetik sensörden aktarılan veriler referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Yatay eksenlerde gidilen mesafenin ve konumun saptanması için lineer manyetik sensörler kullanılmıştır.

4. Materyal ve Metot

Sistemde, ünitesinden alınan güncel şarj durumu, istenen şarj durumu ve aracın durağan olup olmadığı gibi veriler yer istasyonu biriminde işlenir ve aracın şarj işlemi yapılır. Şekil 5'te verildiği gibi tüm robotun kontrolünü sağlayan bir temel kontrol birimi vardır. Kontrol birimi araç ünitesinden ve manyetik sensörlerden gelen verileri işlemekte ve motor sürücülerine gerekli hareket işaretlerini vermektedir. Kontrol birimi gerçek zamanlı haberleşmeye sahip olmalıdır. Bu sebeple kontrol birimi olarak ESP 32 DOIT V1 kullanılmaktadır. Kontrol birimi araç ünitesi ile Wi-Fi üzerinden master – slave ilişkisi aracılığı ile haberleşmektedir. Şekil 6'da kullanılan donanımlar verilmektedir.



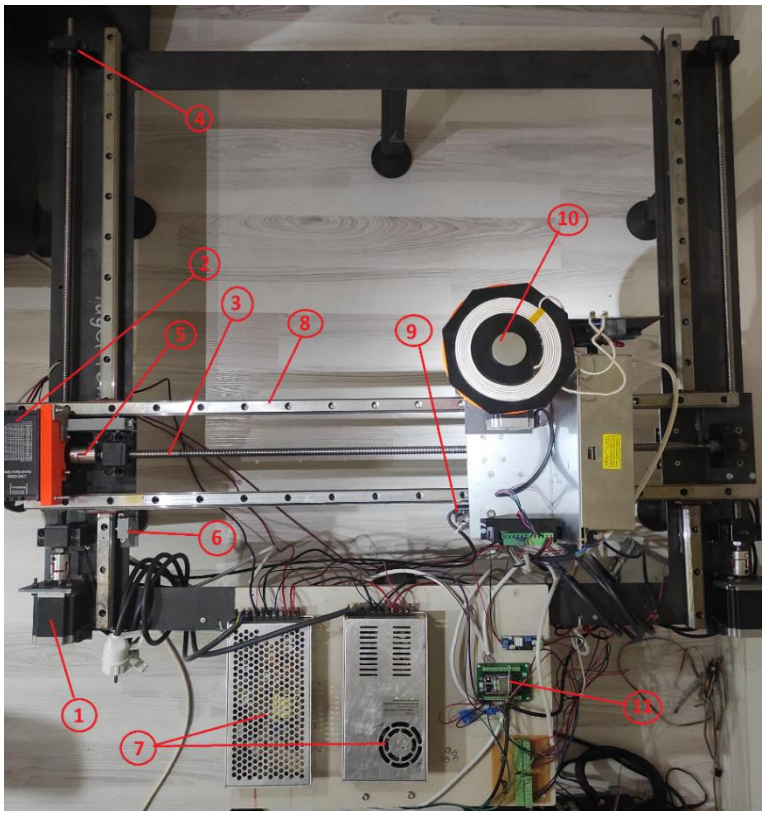
Şekil 5. Kartezyen robot sistemi blok diyagramı.



Şekil 6. Kullanılan ekipmanlar.

Sistemin temel çalışma prensibi x ve y eksenlerinde bulunan lineer manyetik şerit ve lineer manyetik sensörler vasıtası ile o an uç işlevcisinin bulunduğu konumu ve katettiği yolu tespit ederek, şarj istasyonu üzerine park etmiş durumda olan aracın altında bulunan araç ünitesi ile hizalamayı yapmaktadır. Araç ünitesinden kablosuz şekilde iletilen güncel şarj durumu, istenen doluluk oranı ve aracın durma-çalışma durumu bilgileri yer istasyonunda işlenmekte ve bu doğrultuda şarj işlemi başlamakta, durmakta ya da devam etmektedir. Araç istasyon üzerinde konumlandığında gerilim ve akım sensörleri vasıtası ile aracın güncel şarj durumu tespit edilmekte ve aracın durağan halde olması durumunda manyetik lineer sensörler ve hall effect sensör aracılığı ile aracın konumu tespit edilmekte, şarj pedlerinin hizalanması sağlanmakta ve şarj işlemi başlatılmaktadır. Şarj süreci boyunca aracın çalıştırılmaması gerekmektedir. Şarj işlemi sırasında aracın çalıştırılması halinde güvenlik tehdidi oluşmaması adına şarj işlemi sonlandırılır. Şarj prosesi devam ettiği takdirde istenen doluluk değerine ulaşılması halinde şarj işlemi sonlandırılır ve kartezyen robot başlangıç pozisyonuna döner.

Kartezyen platform inşa edilirken x ekseni mekanik olarak diğer eksenlerden daha büyük bir yük altında olacağı için birbirine paralel iki mil ve iki motordan oluşan daha güçlü bir yapı tercih edilmiştir. Z ekseninin hareketini kolaylaştırmak adına kremayer dişli tercih edilmiştir. X ve Y eksenlerinde kullanılan motorlar ve sürücüler 1600 adımda 1 tam tur atılacak şekilde, kullanılan miller ise 4 mm hatveli olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede X ve Y eksenlerinde motor çözünürlüğü 0.0025 mm olarak belirlenmiştir. Z ekseninde ise benzer şekilde motor ve sürücü 1600 adımda bir tam tur atacak şekilde ve kullanılan kremayer dişli de 5 mm diş aralığına sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede Z ekseninde motor çözünürlüğü 0.0031 mm olarak belirlenmiştir. Y ekseninin fiziki uzunluğundan kaynaklı olarak en yavaş eksendir ve optimal hız değeri 12.5 mm / sn olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak da X ekseninin hızı 10 mm / sn ve Z ekseninin hızı 3.4 mm / sn değerinde belirlenmiştir. Şekil 7'de oluşturulan sistem üzerinde kullanılan materyaller numaralandırılarak gösterilmiş ve tablo 2'de materyal isimleri verilmektedir.



Şekil 7. Oluşturulan kartezyen robot sistemi

Tablo 2. Kartezyen robot sistemi materyalleri.

No	Materyal
1	Primopal PHB57S76-430-SF Step Motor
2	Leadshine M542 Step Motor Sürücü
3	SCR 1204 Vidalı Mil
4	BK 12 – BF 12 Mil Yatağı
5	GS 12 Kaplin
6	Sınır Anahtarı
7	SMPS (Güç kaynakları)
8	SH 20 Lineer Ray
9	MS 5 Lineer Manyetik Sensör
10	200 W Kablosuz Şarj Modülü
11	ESP 32 DEVKit V1

A. ESP32 Geliştirme Kartı

Kartezyen robot sistemi kablosuz ve gerçek zamanlı haberleşmeye olanak sağlayan bir kontrolcüye ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple Wi-Fi ve bluetooth iletişimi ile çeşitli uygulama alanlarına olanak tanıyan ESP32 kartı kullanılmıştır. Şekil 6. B'de görülen ESP32 geliştirme kartı, 30 pinli yapısı ve 12 bitlik dahili ADC bulundurması ile çok sayıda sensörden yüksek hassasiyet ile veriler alabilmekte ve işleyebilmektedir. Arduino IDE, MicroPhyton ve ESP – IDF gibi çok sayıda programlama dili ile entegre çalışabildiği için esnek bir programlama desteği sunmaktadır. Genellikle IoT (Internet of Things) projeleri, otomasyon sistemleri ve sensör ağları gibi sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

B. SH 20 Lineer Ray – BRA BRL 20 CC Lineer Araba

Kartezyen robot sistemi üzerinde bulunan x ve y eksenlerinin motor milleri ile paralel ilerleyebilmesi için şekil 6. A'da görülen lineer ray ve arabalara ihtiyaç duyulmuştur. Kartezyen robotun stabil hareket etmesi ve eksenlerde takılmalar yaşamaması adına esnemeyen ve kare kesitli imal edilmiş lineer raylar kullanılmıştır. Ayrıca imbus cıvata kullanımı için uygun özelliklere de sahiptir. Sistemin üzerine binecek yük miktarı göz önüne alınarak 20 mm genişliğinde rayların yeterli olacağı belirlenmiş ve bu doğrultuda da raylara uygun olacak şekilde lineer arabalar tercih edilmiştir.

C. PrimoPal PHB57S76-430-SF Step Motor- Leadshine M542 Step Motor Sürücü

Kartezyen robot sisteminde sensörlerden alınan veriler doğrultusunda kartezyen robotun uç işlevcisini istenen noktaya taşıması adına step motor ve bu motorlara uygun sürücüler kullanılmıştır. Şekil 6. C'de gösterilen ve dört kutuplu bir yapıya

sahip olan PrimoPal PHB57S76-430-SF step motorlar, 180 N/cm tutma torkuna sahiptir ve 3 A akım değeri kullanmaktadır. Endüstriyel motorlara oranla hafif olan 1050 gramlık bir ağırlığa sahiptir. Şekil 6. D'de görülen Leadshine M542 step motor sürücü ise sistemde kullanılan güç kaynaklarına uygun olacak biçimde 24-50 V çalışma gerilimine sahip ve nema 17,23,34 tip motorlarda sorunsuz kullanılabilecek bir şekilde tercih edilmiştir.

D. MS5 Lineer Manyetik Sensör- Manyetik Şerit

Kartezyen robot sisteminde motorların hareketi sonucunda lineer raylardaki ilerlemenin ölçülmesi adına manyetik sensör ve şeritlere ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 6. E'de gösterilen ve manyetik enkoder olarak da bilinen MS5 lineer manyetik sensör, konum ve pozisyon belirlemede hassas ölçümler için kullanılmaktadır. Temassız ve 0.8 mm ölçüm aralığı ile oluşturulan sistemde sürtünme kaynaklı oluşabilecek ölçüm problemlerinin ve ölçüm hatalarının önüne geçmektedir. 100 kHz ölçme hızı ile kontrolcüye gecikmesiz olarak veri iletilebilmektedir. Lineer manyetik sensör, encoder mantığı ile manyetik bant üzerinden temas olmaksızın okuma yapılmasını mümkün kılan ve pozisyon belirleme amacıyla robotik ve otomasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir sensör grubudur. MS5 manyetik sensörler IP67 sertifikası ile su, yağ, toz ve kirli ortamlar gibi dış etkenlerden etkilenmez. Bu sayede elektrikli araç şarj istasyonu gibi zorlu dış etkenler altında çalışan sistemlerde uzun süreli, sağlıklı bir kullanım imkânı sağlar.

E. SCR 1204 Vidalı Mil- SFUR 1204 Mil Arabası

Şekil 6. F'de görülen SFUR 1204 mil arabası ve SCR 1204 vidalı mil, lineer rulman ile sabitlenen hareketlerde güvenilir tahrik unsurlarından biridir. Bilyeli mil 4mm hatve ve 12 mm vida çapı ile servo motor, step motor ve redüktörlü motor gibi unsurlarla beraber hareketin tamamlanmasını sağlar. Vidalar ovalama usulü imal edildiğinden 55 HRC seviyesinde yüzey sertliğine sahiptir. 4 sıra misket sırası ile yüksek eksenel kuvvet dayanım gücüne sahiptir.

F. 200 W Kablosuz Şarj Modülü

Şekil 6. G'de kullanılan kablosuz şarj modülü verilmiştir. Sistemde alıcı ve verici bobinler arasında 200 W aktarımına sahip HUAGON NS 1200 kablosuz şarj modülü tercih edilmiştir. Çıkış gerilimi 16 – 58.5 V aralığındadır. 12 seri batarya grubu ile kullanıldığında 50.4 V gerilim ve 4 A akım değerine sahiptir. 24 V çalışma gerilimine ihtiyaç duyan NS 1200, adaptör kayıpları haricinde en az %88 verimlilik sağlamaktadır. Aşırı güç çekilmesi ya da giriş voltajının çalışma aralığının dışında olması durumlarında alarm sistemi devreye girmekte ve güvenli bir güç aktarımı sağlamaktadır.

G. INR 21700 12S Batarya grubu ve DL – J15C 60 A BMS

Kartezyen robot sisteminin güç aktarımını sağlayacağı ünite için Şekil 6. H'de görülen 12 seri INR 21700 batarya grubu tercih edilmiştir. Tek hücre için nominal şarj değeri 4.2 V ve 4 A'dir. 12 seri şeklinde kullanıldığında bu değerler 50.4 V ve 4 A olarak belirlenmiştir. Batarya grubunun şarj ve deşarjı için BMS devresine ihtiyaç duyulmuş ve 60 A deşarj değerine sahip DL – J 15C BMS devresi kullanılmıştır. BMS devresi de batarya grubu ve kablosuz şarj modülü ile uyumlu olacak şekilde 50.4 V şarj gerilimine sahip olacak şekilde tercih edilmiştir.

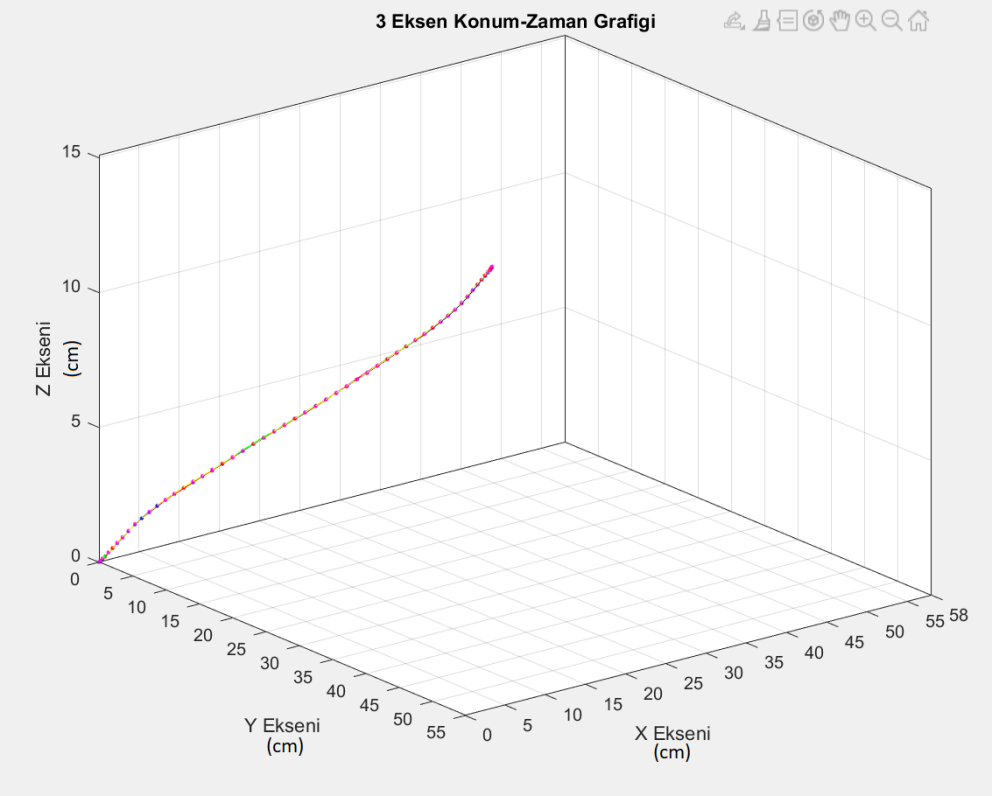
5. Deneysel Çalışmalar

Şarj pedlerinin hizalanması elektrikli araç kablosuz şarj yöntemi ve bu yöntemin enerji verimliliği açısından son derece önemlidir. Yapılan çalışmada şarj istasyonunun manyetik konum algılamaya bağlı olarak ne derecede hassasiyet gösterdiği incelenmiştir. Yer istasyonunun çalışma uzayı 580 mm x ekseni, 550 mm y ekseni ve 150 mm z ekseni olarak belirlenmiştir. Şarj edilmek üzere kartezyen robotun bulunduğu şarj istasyonu alanına park eden sürücülerin hatalı park etme durumları göz önüne alınmıştır. Bu sebeple kartezyen robotun çalışma uzayı içerisinde her noktada yüksek hassasiyet ile çalışabilmesi gerekli görülmüştür. Bu durum sonucunda kartezyen robot çalışma uzayı yatay ve dikey olacak şekilde ikiye bölünmüş ve dört ana bölge için analizler yapılmıştır. Tablo 3'de çalışma uzayının 4 farklı bölümünde gidilen konumlar yer almaktadır.

Tablo 3. Çalışma uzayının farklı bölgelerinde gidilen konumlar.

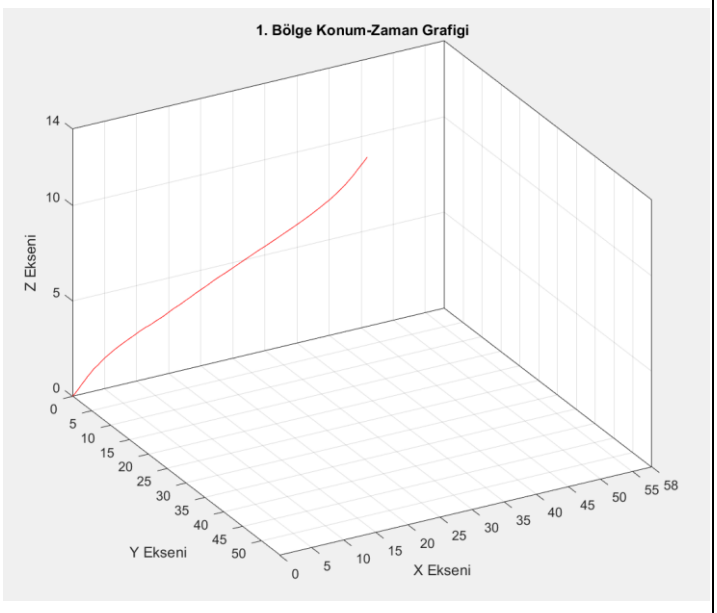
Bölge	X Ekseni	Y Ekseni	Z Ekseni
1	360 mm	169 mm	122 mm
2	360 mm	450 mm	122 mm
3	120 mm	169 mm	122 mm
4	120 mm	450 mm	122 mm

Sistemin tekrarlama hassasiyetine yönelik yapılan testlerde yer istasyonunun x, y ve z eksenlerinde belirlenen aynı konuma on kez gitmesi istenmiştir. Bu testte kartezyen robotun 55 saniye olarak belirlenen sürede hareket uzayının x ve y eksenleri için orta noktası olan, x ekseninde 240 mm, y ekseninde 300 mm ve z ekseninde 122 mm ilerlemesi istenmiş ve sistemin tüm eksenlerde toplam hata ortalaması 2.85 mm olarak gerçek zamanlı şekilde ölçülmüştür. Şekil 8'de sistemin tekrarlama hassasiyetinin ölçülmesi ile elde edilen 3 boyutlu uzaydaki hareketi verilmektedir.

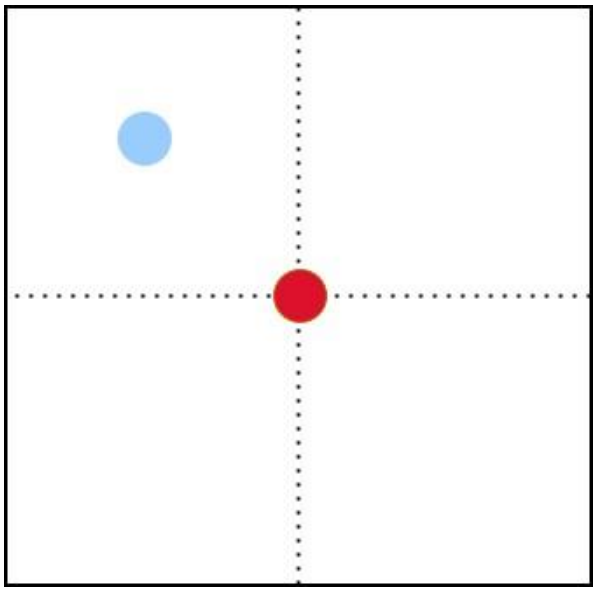


Şekil 8. Kartezyen robotun tekrarlama hassasiyeti grafiği.

Bu bağlamda 36 saniye toplam hareket zamanı olarak belirlenmiş ve hareket uzayının tüm bölgeleri için istenen hız ve ivme değerlerinde istenen konuma ulaşabildiği ve park eden aracın altındaki şarj pedi ile hizalamanın sağlanabildiği tespit edilmiştir. Bu incelemeler sonucunda gerçek zamanlı olarak elde edilen konum – zaman verileri Şekil 9 – 12'de verilmektedir.



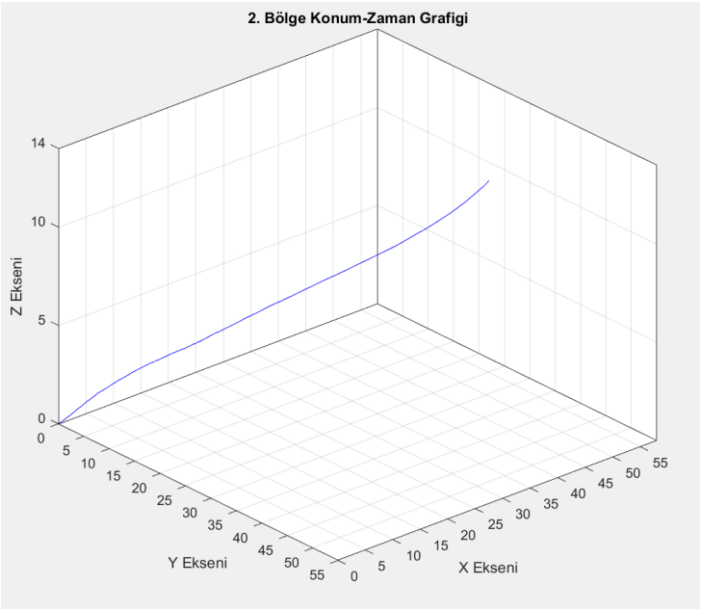
A) 1. Bölge konum-zaman grafiği



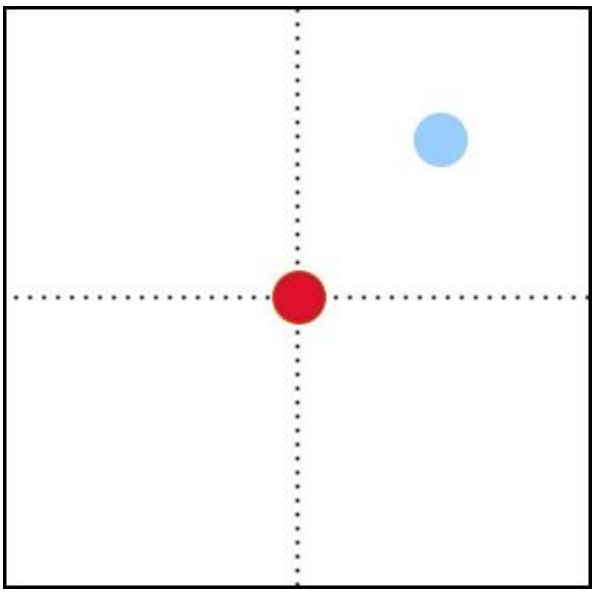
B) 1. Bölgenin çalışma uzayındaki konumu

Şekil 9. Kartezyen robot 1. bölge konum- zaman grafiği ve çalışma uzayındaki konumu.

Şekil 9. A'da kırmızı ile gösterilen kartezyen robotun orta noktasından, mavi ile gösterilen ve 1. çalışma bölgesinde bulunan alana kartezyen robotun ulaşması gösterilmiştir. Şekil 9. B'de ise bu hareket sırasında kartezyen robotun eksenlerindeki hareket değişimleri grafik halinde görünmektedir. 1. bölgedeki konum bilgileri tablo 3'te bölge 1 olarak verilmiştir.



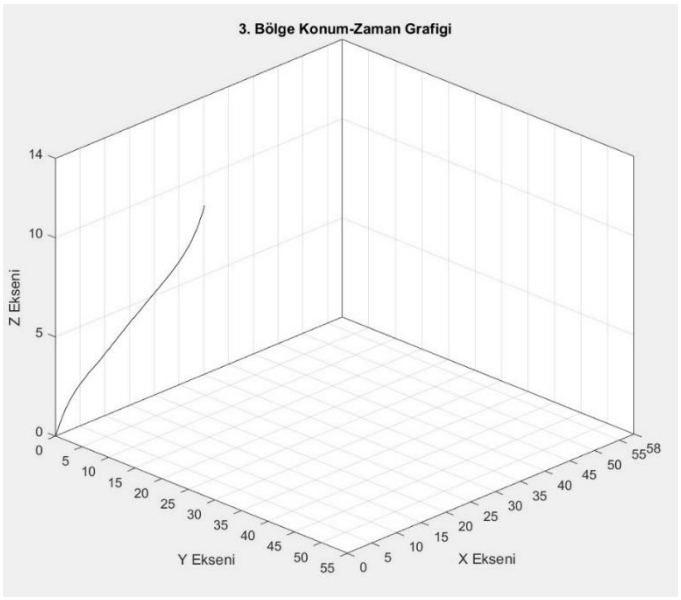
A) 2. Bölge konum-zaman grafiği



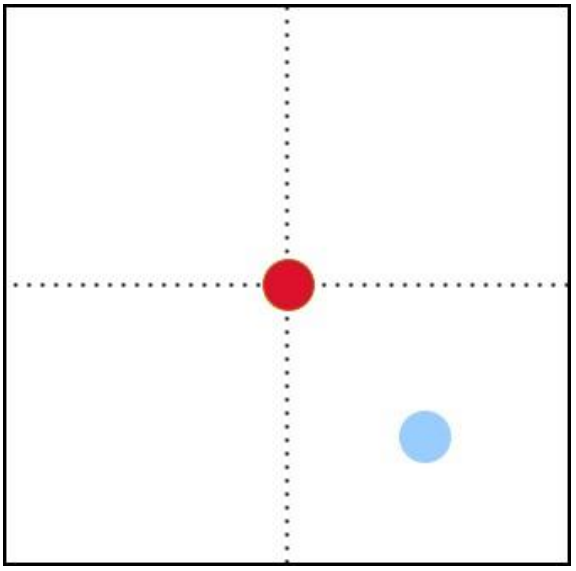
B) 2. Bölgenin çalışma uzayındaki konumu

Şekil 10. Kartezyen robot 2. bölge konum- zaman grafiği ve çalışma uzayındaki konumu.

Şekil 10. A'da kırmızı ile gösterilen kartezyen robotun orta noktasından, mavi ile gösterilen ve 2. çalışma bölgesinde bulunan alana kartezyen robotun ulaşması gösterilmiştir. Şekil 10. B'de ise bu hareket sırasında kartezyen robotun eksenlerindeki hareket değişimleri grafik halinde verilmektedir.



A) 3. Bölge konum-zaman grafiği

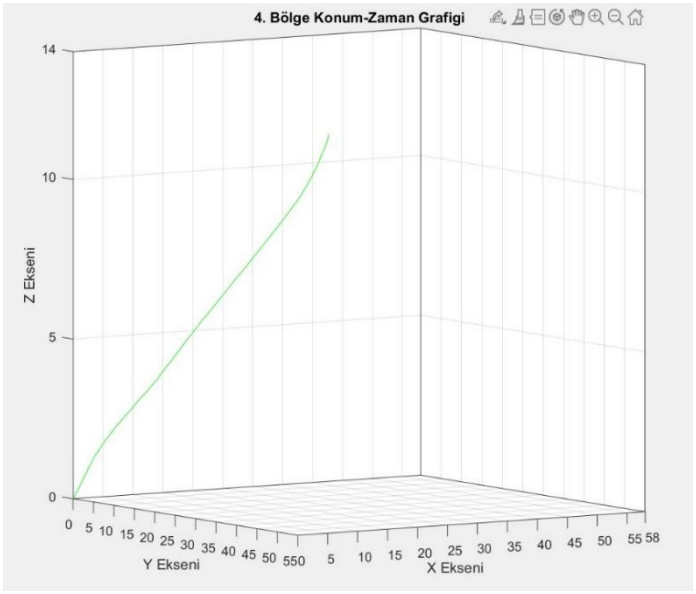


B) 3. Bölgenin çalışma uzayındaki konumu

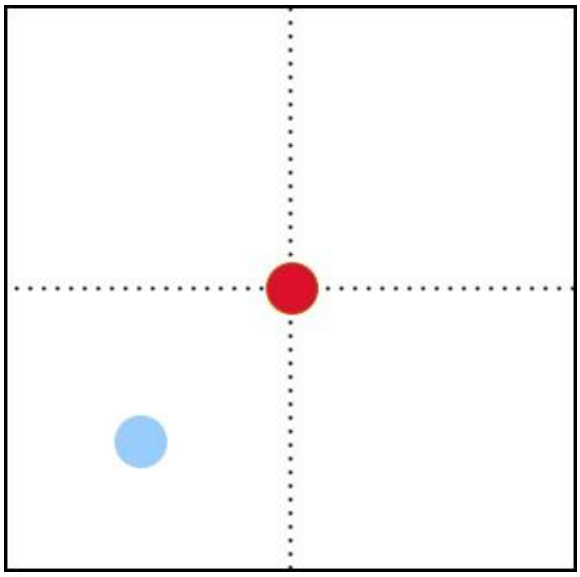
Şekil 11. Kartezyen robot 3. bölge konum- zaman grafiği ve çalışma uzayındaki konumu.

Şekil 11. A'da kırmızı ile gösterilen kartezyen robotun orta noktasından, mavi ile gösterilen ve 3. çalışma bölgesinde bulunan alana kartezyen robotun ulaşması gösterilmiştir. Şekil 11. B'de ise bu hareket sırasında kartezyen robotun eksenlerindeki hareket değişimleri grafik halinde görünmektedir. 3. bölgedeki konum bilgileri tablo 3'te bölge 3 olarak verilmiştir.

Şekil 12. A'da kırmızı ile gösterilen kartezyen robotun orta noktasından, mavi ile gösterilen ve 4. çalışma bölgesinde bulunan alana kartezyen robotun ulaşması gösterilmiştir. Şekil 12. B'de ise bu hareket sırasında kartezyen robotun eksenlerindeki hareket değişimleri grafik halinde görünmektedir. 4. bölgedeki konum bilgileri tablo 3'te bölge 4 olarak verilmiştir.



A) 4. Bölge konum-zaman grafiği



B) 4. Bölgenin çalışma uzayındaki konumu

Şekil 12. Kartezyen robot 4. bölge konum- zaman grafiği ve çalışma uzayındaki konumu.

6. Sonuç ve Değerlendirme

Elektrikli araçların kablosuz olarak şarj edilebilmesini sağlayan otonom bir sistem olan kartezyen robot geliştirilmiştir. Şarj istasyonuna hatalı park etme durumlarında güç kaybını minimuma indirme amacıyla ortaya çıkmıştır. Elektrikli araç sürücüleri yerde bulunan kablosuz şarj sistemlerini kullanırken park etme esnasında gereken yüksek hassasiyeti sağlayamamaktadır. Bu sebeple Kartezyen robot sistemi ile bu işlem sırasında yaşanan enerji kaybı minimuma indirilmektedir. Kartezyen robot sistemi elektrikli araç sürücülerine yatay eksende 55 cm ve dikey eksende 55 cm olacak şekilde park alanı toleransı sağlamaktadır. Kartezyen robotun sağlamış olduğu bu alan 4 bölgeye ayrılmış ve hatalı park durumlarında kartezyen robotun üzerindeki herhangi bir bölgeye park edilmesi durumunda karşılaşılacak olan senaryolar değerlendirilmiştir. Her bölgeye park edilmesi durumunda kartezyen robotun güç kaybını minimuma indirme amacı ile verici şarj pedini aracın altında bulunan alıcı şarj pedi ile hizalama süreleri incelenmiştir. Elektrikli araç kablosuz şarj sistemleri için tasarlanan kartezyen robot evlerin garajlarında, otoparklarda ya da alışveriş merkezleri gibi araçların uzun süreli park edildiği alanlarda kullanılması amacı ile ortaya çıkmış bir sistemdir.

Teşekkür

Bu çalışma KBÜBAP-22-YL-156 kodlu BAP projesi ve Tübitak 2210 C öncelikli alanlar burs programı tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynakça

[1] V. Yazıcı and E. Özdemir, “Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri,” Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2013.
[2] S. Benedikt, “Cable-free charge-up – Inductive charging stations for electric vehicles,” Jan. 2013.
[3] G. Maggeto and J. Mierlo, “Electric and Hybrid Vehicle Technology International,” 2000.
[4] C. Panchal, S. Stegen, and J. Lu, “Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5. Elsevier B.V., pp. 922–937, Oct. 01, 2018. doi: 10.1016/j.jestch.2018.06.015.
[5] A. Kerem and H. Gürbak, “Elektrikli araçlar için hızlı şarj istasyonu teknolojileri,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, Aug. 2020, doi: 10.29109/gujsc.713085.
[6] S. A. Birrell, D. Wilson, C. P. Yang, G. Dhadyalla, and P. Jennings, “How driver behaviour and parking alignment affects inductive charging systems for electric vehicles,” *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 58, no. PD, pp. 721–731, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.trc.2015.04.011.
[7] W. Ni *et al.*, “Radio alignment for inductive charging of electric vehicles,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 11, no. 2, pp. 427–440, Apr. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2400925.
[8] R. Mecke and C. Rathge, “High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap,” in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2004, pp. 1737–1743. doi: 10.1109/PESC.2004.1355378.
[9] F. Nakao, Y. Matsuo, M. Kitaoka, and H. Sakamoto, “Ferrite core couplers for inductive chargers,” in *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002, PCC-Osaka 2002*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002, pp. 850–854. doi: 10.1109/PCC.2002.997631.

[10] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and optimisation of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, 2009, pp. 2081–2088. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316197.
[11] C. Zheng, H. Ma, J. S. Lai, and L. Zhang, “Design considerations to reduce gap variation and misalignment effects for the inductive power transfer system,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 11, pp. 6108–6119, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2424893.
[12] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, “Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6533–6545, Oct. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2574993.
[13] B. Özbey, “Elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemi tasarımı ve optimizasyonu,” İstanbul, Aug. 2020.
[14] W. Li, H. Zhao, S. Li, J. Deng, T. Kan, and C. C. Mi, “Integrated LCC compensation topology for wireless charger in electric and plug-in electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4215–4225, Jul. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2384003.
[15] Y. Gao, C. Duan, A. A. Oliveira, A. Ginart, K. B. Farley, and Z. T. H. Tse, “3-D coil positioning based on magnetic sensing for wireless EV charging,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 578–588, Sep. 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2696787.
[16] C. Zheng *et al.*, “High-efficiency contactless power transfer system for electric vehicle battery charging application,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 65–74, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2339279.
[17] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. Mi, “A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 11, pp. 6011–6014, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2446891.
[18] Y. Tezcan, H. Ünal, and M. Boztepe, “Endüktif kuplajlı kablosuz güç aktarım sistemlerinin analizi ve tasarımı,” İzmir.
[19] H. Chen, C. Liu, Y. Zhang, S. Liu, J. Wu, and X. He, “Metal object and vehicle position detections integrated with near-field communication for wireless EV charging,” *IEEE Trans Veh Technol*, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3167846.
[20] H. Tarlak, “Elektrikli araçlar için iki yönlü şarj devresi tasarımı,” Kırklareli, Sep. 2018.
[21] P. T. Krein and M. Yilmaz, “Review of Charging Power Levels and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles,” 2012.
[22] E. Çetin, “Handling Interaction Forces Between an Object and Cartesian Robot Arm in Planar Motion,” Aug. 2002. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/257941469
[23] Z. Bingül and S. Küçük, *Robot Kinematiği*, 3. Baskı. Umuttepe Yayınları.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin Aralık Değerli Tip-2 Bulanık PID Yöntemi ile MGNİ Denetimi

Fuat Kılıç[a]*

[a]Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** fuatkilic@balikesir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, şebekeye doğrudan bağlı değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatörlü (ÇBAG) rüzgâr türbinlerine uygulanmak üzere aralık değerli tip-2 bulanık PID (ADT2-BPID) maksimum güç noktası izleme (MGNİ) denetleyicisi tasarlanmıştır. ÇBAG altyapılı rüzgâr türbinleri, sabit frekansta değişken hızlı rüzgâr enerji dönüşüm sistemleri (REDS) olarak çalışır. Şimdiye kadar bulanık mantık denetleyicileri dünya çapında birçok alandaki sistemlerde büyük bir başarı ile uygulanmıştır. Kullanılan bulanık mantık sistemleri büyük çoğunlukla tip-1 bulanık mantık sistemleri olmasına rağmen aralık değerli tip-2 bulanık PID denetleyicilerinin, bozucu etkiler ve belirsizliklerle daha iyi başa çıkabildikleri ve salınımları ortadan kaldırabildikleri için daha sağlam oldukları bilinmektedir. Bu araştırmada, rüzgâr hızının değişimine göre maksimum güç noktası değişimi ve REDS sistemindeki meydana gelebilecek parametre değişimleri durumunda daha iyi denetim cevabı üretmesi beklenen aralık değerli tip-2 bulanık PID algoritması önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, MGNİ denetleyicisinin en uygun kanat ucu hız oranına yakınsaması ve rüzgârdan elde edilebilecek maksimum güç sabitine ulaşması bakımından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda benzetim grafiklerinden MGNİ denetleyicisinin, geleneksel PI/PID tabanlı MGNİ yöntemlerine nazaran daha üstün bir performans sergilediği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Rüzgâr Enerjisi, ÇBAG, MGNİ, Bulanık Mantık, ADT2-BPID*

MPPT Control of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators by Interval Type-2 Fuzzy PID Method

ABSTRACT

In this study, interval type-2 fuzzy PID (IT2-FPID) maximum power point tracking (MPPT) controller is designed to be applied to grid-connected variable-speed doubly-fed induction generator (DFIG) wind turbines. Wind turbines based on DFIGs operate as variable speed wind energy conversion systems (WECS) at fixed frequency. So far, fuzzy logic controllers have been applied with great success to systems in many fields worldwide. Although the fuzzy logic systems used are mostly type-1 fuzzy logic systems, IT2-FPID controllers are known to be more robust since they can better cope with disturbances and uncertainties and eliminate oscillations. In this research, IT2-FPID algorithm is proposed, which is expected to produce better control response in case of maximum power point change according to the change of wind speed and parameter changes that may occur in the WECS system. The results obtained in this study are evaluated in terms of convergence of MPPT controller to the optimal blade tip speed ratio and achieving the maximum power constant that can be obtained from the wind. As a result of this evaluation, it is shown from the simulation graphs that MPPT controller exhibits a superior performance compared to the conventional PI/PID based MPPT methods.

Keywords: *Wind Energy, DFIG, MPPT, Fuzzy Logic, IT2-FPID*

I. GİRİŞ

Günümüzde çevre kirliliği ve nüfus artışına bağlı olası bir enerji krizi, dünyayı temiz, verimli ve yenilenebilir enerji üretmek için yeni mekanizmalar tasarlamaya yöneltmiştir. Mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi, enerji endüstrisinde son derece büyüyen çevre dostu ve sonsuz bir enerji kaynağı olmuştur[1] . Rüzgâr enerji (RE), birçok ülke tarafından kullanılan etkili bir alternatiftir ve dünya çapında birçok araştırmacı gelecek vaat eden yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak bu enerjiye dikkat çekmiştir. Bu enerji, elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların yerini almak için etkili bir çözüm olarak görülmekte olup doğadaki karbondioksit emisyonlarının azaltılmasında önemli bir role sahiptir. Ayrıca, bu enerjinin kullanımı çevresel sürdürülebilirliğe önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, uzun vadede RE'ye dayalı enerji sistemlerini kurmak için yatırım yapmak pahalıdır, ancak tabiatı kirletici olmayan yapıları nedeniyle daha iyi bir seçenek olarak kabul edilirler[2].

Rüzgâr türbinleri, yatay eksenli ve dikey eksenli olarak ikiye ayrılabilir. Çünkü bu iki tip çalışma prensibi, maliyet, verim, şekil ve performans açısından farklılık gösterir[3], [4] . Rüzgâr türbinleri ayrıca sabit hızlı rüzgâr türbinleri (SHRT) ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri (DHRT) olarak hızlarına göre de ikiye ayrılabilir[5]. Rüzgâr türbinlerinin şaftlarına bağlanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan generatörler de kendi aralarında sargılı veya kalıcı mıknatıslı senkron generatörler, kendinden uyartımlı asenkron generatörler veya çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG), doğru akım generatörleri ve çok fazlı generatörler olarak sınıflandırılabilir. ÇBAG, basitlik, denetim kolaylığı, az bakım, düşük maliyet ve yüksek dayanıklılık gibi birçok avantajı nedeniyle RE'de kullanımı en önde gelen generatörlerden biri olarak kabul edilmektedir. ÇBAG'larda üretilen güç miktarı, sırt sırta bağlı iki çeviricinin kullanılması yoluyla rotor besleme gerilimi değiştirilerek denetlenebilir ve bu gücün bir miktarı rotor besleme gücü olarak kullanılabillir. Bu özellik diğer makinelerde bulunmaz ve bu özellik ÇBAG'ları değişken hız durumunda en güvenilir makine çözümlerinden biri haline getirmektedir[6].

Rüzgâr türbini denetim sistemlerinin birincil hedefi, şebekeye sürekli bir enerji tedariki sağlarken aynı zamanda enerji üretimini en üst düzeye çıkarmaktır[7]. Daha önce yapılan çok sayıda çalışma, rüzgâr üretim sistemlerinin kapsamlı denetimini sağlayan çeşitli MGNİ algoritmalarını ele almıştır. Güç denetim algoritmaları doğrudan ve dolaylı güç denetimi sınıfı olarak ikiye ayrılır. Dolaylı güç denetimi sınıfına giren algoritmalardan optimum moment denetim algoritması, güç sinyali geri besleme algoritması ve kanat ucu hız oranı algoritmasıdır[8], [9]. Doğrudan güç denetim algoritmalarında ise en yüksek gücü elde edebilmek için optimum görev çevrimini bulabilmek için türbin hız, moment, gerilim ve akım gibi büyüklükler iteratif olarak değiştirilmektedir. Bunun dışında var olan diğer algortimalar metasegisel MGNİ algoritmaları ve bulanık mantık ve yapay zeka tabanlı algoritmalardır[10]–[12].

DHRT'lerde maksimum güç noktası izlenmesi için kullanılan güç sinyali geri besleme yönteminde, bir rüzgâr generatörünün rotor hızına karşı optimum güç karakteristikleri bir mikro denetleyici belleğinde tutulur. Bir rüzgâr generatörünün optimum güç çıkışı, türbin çıkış gücü karakteristiği temelinde hesaplanır ve ölçülen gerçek güç çıkışı ile karşılaştırılır. Ortaya çıkan hata bir güç dönüştürücüsünü kontrol etmek için kullanılır. Dolayısı ile yöntemin başarısı türbin karakteristiğine bağlıdır[13]. Optimum moment takibinde generatör optimum momentte çalışır, ancak tepki hızı yavaştır ve denetim verimliliğinin düşük olduğu ifade edilmiştir[14]. Geleneksel saptır-gözle algoritmalarında ise adım büyüklüğünün seçimi, türbin hız salınımları ve maksimum güç noktasını bulmada yanlış arama yönü gibi dezavantajlı durumlar rapor edilmiştir[15] . MGNİ yöntemlerine dayalı olarak yapılan çalışmalarda, kanat ucu hız oranı (KUHO) yönteminin REDS'lerin optimum çalışmasını sağlamak için daha fazla iyileştirme gerektirdiği sonucuna varılmıştır[16]. Ayrıca KUHO tabanlı MGNİ algoritmalarının daha verimli, daha az karmaşık ve salınım olmadan daha hızlı bir yakınsama hızına sahip olduğu bildirilmiştir[17]. Aşırı rüzgar koşullarında türbinin hasarı önlemek için bir koruma moduna girmesi gereken sınırlamalar olabilir. Bu gibi durumlarda, rüzgar türbininin bütünlüğünü korumak için ek kontrol stratejileri kullanılabilir.

Bu çalışmada, yukarıda vurgulanan noktalardan dolayı ÇBAG generatörlü rüzgar türbinleri için türbinin $C_p = (\lambda, \beta)$ karakteristiğine dayanan ADT2-BPID MGNİ denetleyicisi önerilmektedir. Aralık değerli bulanık mantıklı MGNİ denetleyicisi, geleneksel oransal ve integral denetleyiciye (PI) alternatif olarak tasarlanmaktadır. Bulanık mantık denetimi, tam modelin bilinmesini gerektirmediği için sağlam ve tasarımı nispeten basit olma avantajına sahiptir. ADT2-BPID MGNİ denetleyicisinin performansı PI denetleyicisinin performansı ile karşılaştırılmış ve elde edilen grafik sonuçlarına göre ADT2-BPID MGNİ bulanık mantık denetleyicisinin dinamik performansının PI denetleyicisine kıyasla daha iyi olduğu sonucunu varılmıştır. Böylece KUHO tabanlı MGNİ denetleyicinin performansı geliştirilmiştir.

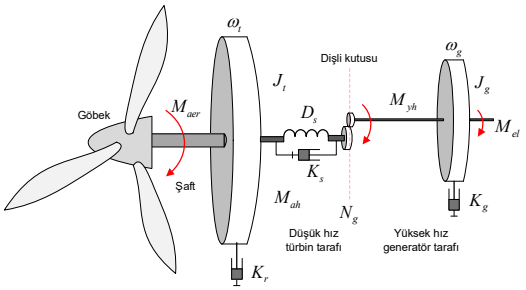
Bu çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: bölüm ikide rüzgâr türbini modeli ve ÇBAG makine modeli sunulmaktadır, bölüm üçte MGNİ denetleyici tasarımı sunulmaktadır, bölüm dörtte elde edilen benzetim grafiklerinden önerilen yöntemin performansı değerlendirilmektedir.

II. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

ÇBAG generatörlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi Şekil. 2'de verilmektedir. Rüzgâr türbinin bileşenleri olana kanatlar rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler sonrasında ÇBAG generatörü şebekeye aktarılmak üzere mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgâr türbin kanatlarına kaldırma ve bastırma kuvveti uygulayarak kanatların kendi etrafında dönmesine neden olan döndürme kuvveti oluşturur. Makine dairesi veya nasel içerisinde bulunan dişli kutusu bu yolla hareket ettirilir. Şekil 1'de görüleceği üzere bu çalışmada MGNİ denetleyici tarafına odaklanılmaktadır. Makine tarafı denetleyiciler ve şebeke tarafı denetleyicileri tasarımı bir başka çalışmanın konusu olduğundan ele alınamamaktadır.

A. Rüzgâr Türbini Modeli

Şekil. 1'de görülen iki kütleli rüzgâr türbini aktarma organı modeli, verimlilik ve basitlik arasında iyi bir dengeye sahip olan ve sıklıkla kullanılan bir modeldir. Mekanik şaft ve dişli kutusu ile bağlanan düşük hızlı şaft (kanatları ve göbeği içeren) ve yüksek hızlı şaft (generatörün rotorunu içeren) olan iki dönen ataletten oluşur. Bağlantı esnek mili, Şekil 10'da gösterildiği gibi bir yay ve bir damper olarak modellenmiştir. Şekil. 1'deki türbin modeline göre M_{aer} aerodinamik moment, ω_t türbin rotoru hızı, M_{ah} alçak hızlı şaft momenti, N_g dişli dönüştürme oranı, M_{yh} yüksek hızlı şaft momenti, J_t türbin eylemsizlik momenti, J_g generatör eylemsizlik monenti, M_{el} elektriksel moment, D_s şaft sertlik oranı, K_r, K_s, K_g sırası ile türbin şaft, alçak hızlı şaft ve generatör şaft sönümleme oranlarıdır.



Şekil. 1 İki kütleli rüzgâr türbini ve güç aktarma organları

Rüzgâr türbini yoluyla üretilecek güç Eşitlik 1'de verilmektedir.

$$P_t = 0,5\rho\pi r^2 v^3 C_p(\lambda,\beta) \tag{1}$$

Burada ρ hava yoğunluğu, r yarıçap, v rüzgâr hızı ve $C_p(\lambda,\beta)$ güç sabitidir. Güç sabiti, λ kanat ucu hız oranı ve β kanat eğim açısına bağlıdır. Bu çalışmada güç sabiti Eşitlik 2 ve 3'te verildiği gibi modellenmektedir.

$$C_p(\lambda,\beta) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda i} - c_3\beta - c_4\beta^{C_5} - c_6\right)e^{\frac{-c_7}{\lambda i}} \tag{2}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - c_4\beta} - \frac{c_8}{\beta^3 + 1} \tag{3}$$

Burada güç sabiti katsayıları sırası ile $c_1 = 0.73, c_2 = 151, c_3 = 0.58, c_4 = 0.002,\ c_5 = 2.14, c_6 = 13.2, c_7 = 18.4$ ve $c_8 = 0.003$'tür[18]. KUHO eşitliği Eşitlik 4'te verilmektedir.

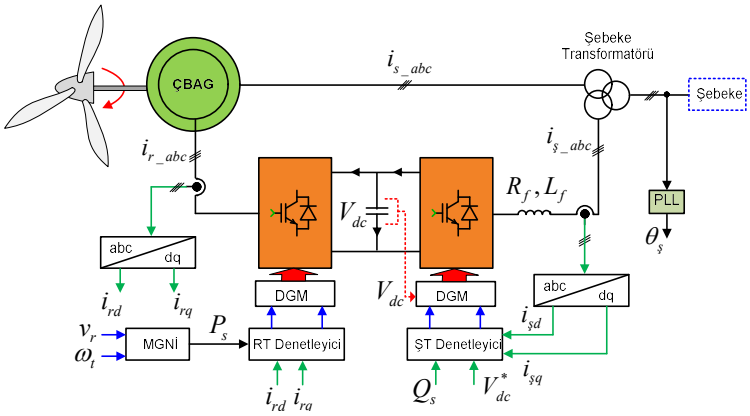
$$\lambda = \frac{\omega_t r}{v} \tag{4}$$

Türbin ve ÇBAG için eylemsizlik momentlerinin toplamı Eşitlik 5'te verilmektedir.

$$J = J_t + N_g^2 J_g \tag{5}$$

B. ÇBAG Matematiksel Modeli

ÇBAG denetimine ait tek hat şeması Şekil 2'de verilmektedir. ÇBAG'ın denetimi için sırta sırta bağlı iki adet çift yönlü çevirici kullanılmaktadır. Bu çeviricilerin denetimi içi rotor tarafı denetleyici (RTD) ve şebeke tarafı denetleyici (ŞTD) kullanılmaktadır.



Şekil 2. ÇBAG denetimine ait tek hat şeması

ÇBAG matematiksel modeli Eşitlik 6-8'de verilmektedir. Eşitlik 6' te stator ve rotor gerilimlerinin d ve q eksenleri bileşenleri sırası ile $v_{sd}, v_{sq}, v_{rd}, v_{rq}$ olarak verilmektedir. Stator ve rotor sargılarına ait dirençleri Rs ve Rr parametreleri temsil etmektedir. $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ sırası ile stator ve rotor d-q bileşenleri akımlarıdır. ω_s ve ω_r stator ve rotor elektriksel açışla hızlarıdır. Rotor elektriksel açısal hızı dişli dönüştürme oranı ile türbin hızının çarpımından meydana gelmektedir.

$$
\begin{aligned}
v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\
v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\
v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\
v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ Stator ve rotor manyetik akı büyüklüklerinin *d-q* eksenleri bileşenleridir. L_s, L_r, L_m stator endüktansı, rotor endüktansı ve ortak endüktans parametreleridir.

$$
\begin{aligned}
\varphi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\
\varphi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\
\varphi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\
\varphi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq}
\end{aligned}
\tag{7}
$$

Eşitlik 8'de görüldüğü gibi yüksek hızlı moment bileşeni generatör mekanik denkleminden elde edilmektedir. Türbin şaftı tarafında alçak hızdaki moment bileşeni, dişli dönüştürme oranı ile yüksek hızlı şaft tarafındaki momentin çarpımından meydana gelmektedir.

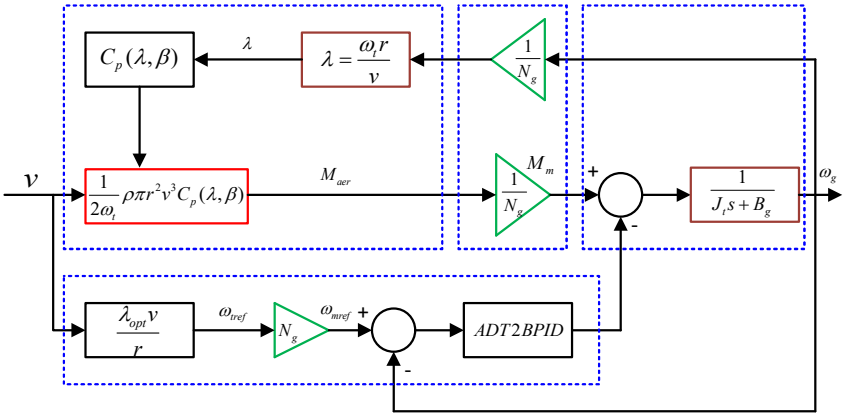
$$
J_g \dot{\omega}_g = M_{yh} - B_g \omega_g - M_{el} \tag{8}
$$

III. Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sistemi

KUHO tabanlı MGNİ yönteminde amaç kanat ucu hız oranını optimum değerde tutmaktır. Bu da maksimum gücün elde edilmesini sağlayan optimum hızın elde edilmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda güç sabiti $C_p(\lambda, \beta)$'de en yüksek değerine ulaşmaktadır. Kanat eğim açısı nominal çalışma durumunda sıfıra ayarlanmaktadır.

$$
\omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} v}{r} \tag{9}
$$

Eşitlik 9'dan anlaşılacağı üzere sabit bir kanat eğim açısında, λ_{opt} değerine ulaşıldığında, optimum güç sabiti C_{popt} değerine ulaşılabilir. Şekil 3'te KUHO tabanlı MGNİ denetleyicinin şeması verilmektedir.



Şekil 3. KUHO tabanlı ADT2BPID MGNİ denetleyicisi şeması

Geleneksel oran katsayısı K_p ve integral katsayısından K_i oluşan doğrusal PI denetleyicisi ile birlikte kapalı döngü MGNİ denetimine ait transfer fonksiyonu ve katsayıları sırası ile Eşitlik 10,11 ve 12'de verilmiştir. Burada Eşitlik 11'de elde edilen 2. Dereceden kapalı döngü karakteristik denkleminde ω_n doğal frekans, ξ sönümleme faktörüdür.

$$G_{kç} = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{Js+B}}{1+(K_p+\frac{K_i}{s})(\frac{1}{Js+B})} \tag{10}$$

$$G_{kç} = \frac{1}{J}\frac{K_p s + K_i}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{11}$$

$$K_p = 2\xi\omega_n - B_g$$
$$K_i = J_t\omega_n^2 \tag{12}$$

A. Aralık değerli tip-2 bulanık PID MGNİ denetleyicisi

Doğrusal olmayan rüzgâr enerji dönüşüm sisteminde, rüzgârın ani değişimi, dışsal bozucu etkilerin mevcudiyeti ve MGNİ referans sinyalinin anlık değişimi durumlarında, denetleyicinin dayanıklı ve kararlı bir dinamik performans sergilemesi son derece kritiktir. Bu nedenle, doğrusal olmayan bu sistem yapısında MGNİ'nin elde edilmesi için sistem performansını geliştirmek için uygun bir denetleyiciye ihtiyaç vardır. Bu sebepten, ADT2BPID denetleyicisi tercih edilmiştir.

Tip-2 bulanık kümeler, dilsel değişkenlerdeki belirsizliklerden kaynaklanan durumları modellemede tip-1 bulanık kümelerden daha gelişmiş özelliklere sahiptir. Belirsizlik etkilerini azaltmak amacıyla, tip-2 bulanık kümeler etkili bir yöntem olarak önerilmiş ve birçok denetim sisteminde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Tip-2 bulanık denetleyicilerin hesaplama yükünü azaltan aralık değerli tip-2 bulanık denetim yapısı mevcuttur. Bu denetim yapısında Takagi-Sugeno-Kang (TSK) çıkarım yöntemi kullanılmaktadır.

Önerilen denetim yapısı, bulanıklaştırma birimi, kural tabanı, çıkarım birimi, tip indirgeme ve durulaştırıcı alt birimlerinden oluşmaktadır. Önerilen denetleyicinin girişleri, hata *e(n)* ve hata değişimi *Δe(n)* olarak tanımlanmıştır. Bu girişler, K_e ve K_d katsayıları ile ölçeklendirilerek bulanıklaştırıcı bloğuna uygulanmaktadır. Hata ve hata değişimi Eşitlik 13'te verilmektedir.

$$E = K_e e, \quad E \in [-1,1]$$
$$\dot{E} = K_d \dot{e}, \quad E \in [-1,1] \tag{13}$$

Durulaştırıcının çıkışında tekrar K_u ve K_i katsayıları ile ölçeklenerek sistem denetim girişi oluşturulmaktadır. Denetleyici çıkış büyüklüğü Eşitlik 14'te verilmektedir.

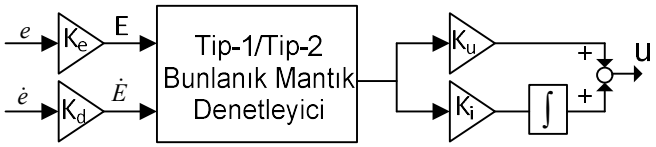
$$u = K_u U + K_i \int U dt, \qquad U \in [-1,1] \tag{14}$$

Kural tablosu oluşturulurken üyelik fonksiyonları negatif (N), sıfır (S), pozitif (P), negatif büyük (NB), negatif orta (NO), pozitif orta ve pozitif büyük dilsel ifadeleri temsil edilmektedir.

Tablo 1. Kural tablosu

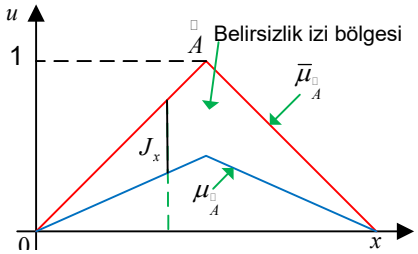
e/De	N	S	P
N	NB	NO	S
S	NO	S	PO
P	S	PO	PB

Tablo 1'de bu çalışmada kullanılan kural tablosu verilmektedir. Tip-2 bulanık denetimciler (T2-BD) kavramı aslında tip-1 bulanık denetleyicilerin (T1-BD) genelleştirilmiş bir şeklidir. T2 ve T1-BD'ler benzer matematiksel operatörleri kullanır. Ancak, T2-BD'leri, T1-BD'lerde olduğu gibi matematiksel olarak tanımlamak kolay değildir.



Şekil 4. ADT2-BPID Blok şeması

Şekil 4'te Tip-1 ve Tip-2 bulanık PID denetim şeması yer almaktadır. Buna göre denetleyici girişinde oran ve türev parametreleri çıkında ise yine sabit bir oran ve integral parametreleri yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan K_e, K_d, K_u ve K_i parametreleri sırasıyla 5.10^{-3}, 25.10^{-6}, 1 ve 40.10^{3}'tür.



Şekil 5. ADT2-BPID üyelik fonksiyonlarından oluşan belirsizlik izi bölgesi

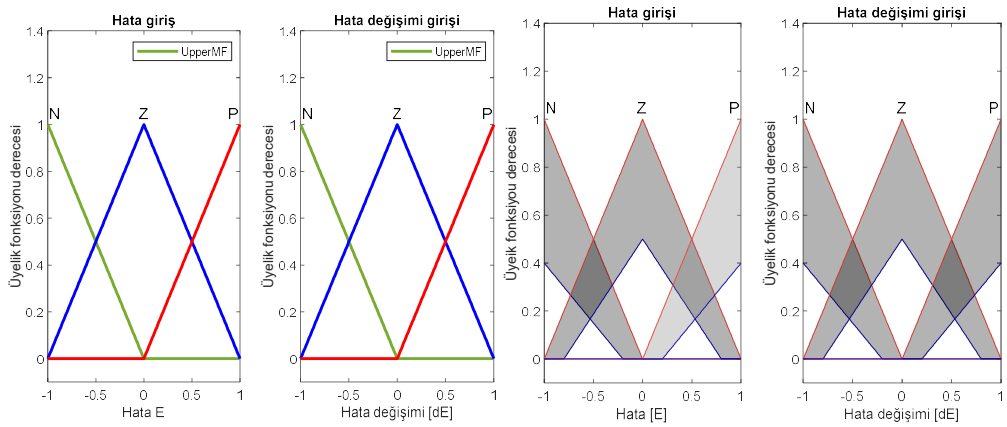
Şekil 5'te görülen T2 bulanık kümesi $\tilde{A}$, aşağıdaki gibi tanımlanan $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ üyelik fonksiyonu ile belirlenir. Eşitlik 15 ve16'da bulanık kümenin matematiksel ifadesi yer almaktadır.

$$\tilde{A} = \left\{ (x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) \middle| \forall x \in X,\ \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \right\} \tag{15}$$

Burada $0 \le \mu_{\tilde{A}}(x,u) \le 1$ ve birincil üyelik değeri $u \in J_x \subseteq [0,1]$ aralığında bir sayısal değerdir. Sürekli tanım bölgesinde, $\tilde{A}$ kümesi aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u) / (x,u), J_x \subseteq [0,1] \tag{16}$$

Burada $\iint$ tanım uzayındaki tüm x ve u değerlerinin kesişimini temsil etmektedir. J_x, x'in asıl üyelik fonksiyonu, $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ ise x'in ikincil üyelik fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. T2 bulanık kümesinde $\tilde{A}$, belirsizlik asıl üyelik fonksiyonundaki bir bölgede ifade edilir. Belirtilen bu küme, bir üst üyelik fonksiyonu olan $\overline{\mu}_{\tilde{A}}$ ve bir alt üyelik fonksiyonu olan $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ $\mu\tilde{A}$ ile tanımlanır. Bu durumda bu bölge belirsizliklerin izi olarak ifade edilmektedir. Eğer $\forall u \in J_x \subseteq [0,1]$ için $\mu_{\tilde{A}}(x,u) = 1$ olarak bir aralık değerli T2 bulanık küme elde edilmekledir. Şekil 6'da ise tip-1 ve tip-2 bulanık mantık üyelik fonksiyonları verilmektedir. Bu üyelik fonksiyonlarına göre tip-2 bulanık mantık denetleyici için aralık değerli üyelik fonksiyonlarının değişimi Şekil 5'te görülen tanıma göre yer almaktadır.



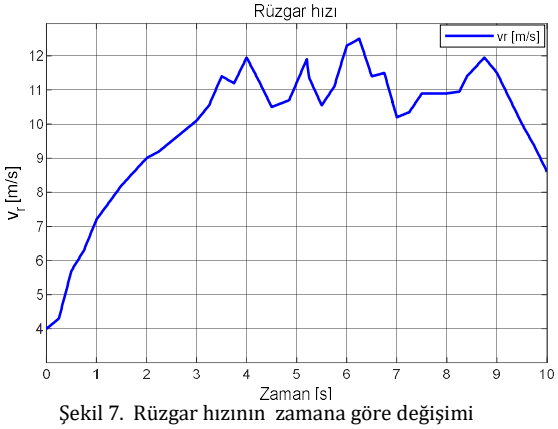
Şekil 6. a) Tip-1 bulanık mantık b)tip-2 bulanık mantık üyelik fonksiyonları

Tablo 1. Türbin ve generatör parametreleri

Türbin ve ÇBAG parametreleri	Değer		
Kanat sayısı	3	Stator direnci (mΩ)	$2.6e^{-3}$
Türbin kanat yarıçapı (m)	44	Rotor direnci (mΩ)	$2.9e^{-3}$
Dişli kutusu oranı	100	Stator kaçak endüktansı (µH)	$87e^{-6}$
Türbin gücü (MW)	2	Rotor kaçak endüktansı (µH)	$87e^{-6}$
Stator gerilimi (V)	690	Mıknatıslanma endüktansı (mH)	$2.5e^{-3}$
DA Bara Gerilimi (V)	1200	Eylemsizlik momenti (kg.m2)	100
Kutup Sayısı	4	Hız (d/d)	1500

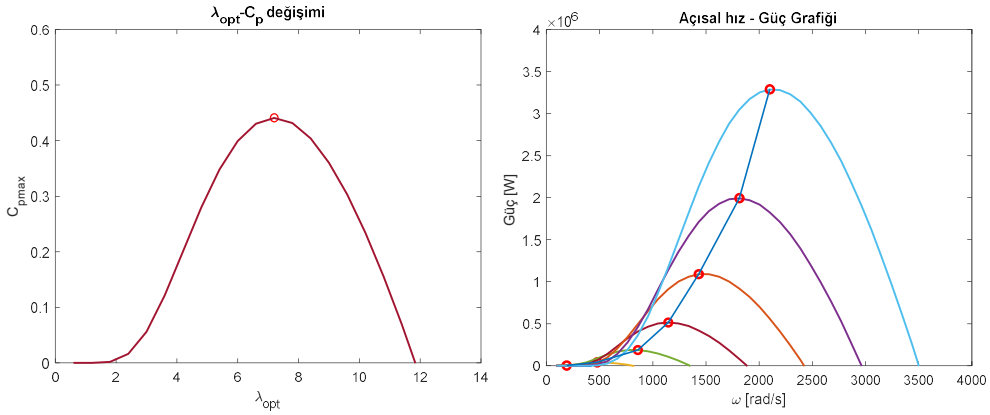
Tablo 2'de bu çalışmada kullanılan türbin ve generatör parametrelerine ait tablo yer almaktadır. Bölüm IV'de benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar verilmektedir.

IV. SONUÇLAR



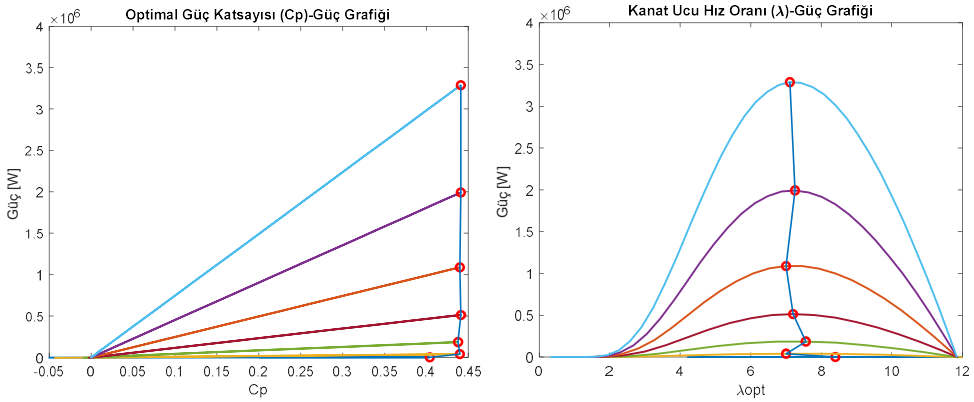
Şekil 7. Rüzgar hızının zamana göre değişimi

Şekil 7'de benzetim çalışmalarında kullanılan rüzgâr hızının değişimi görülmektedir. Rüzgâr profiline göre enerji üretimi 4 m/s'de başlamaktadır. Rüzgâr hızının belirli bir süreden sonra 13 m/s ile 10 m/s hızları arasında ani olarak değişmesi üzerine kurulu bir rüzgâr profili uygulanmıştır.



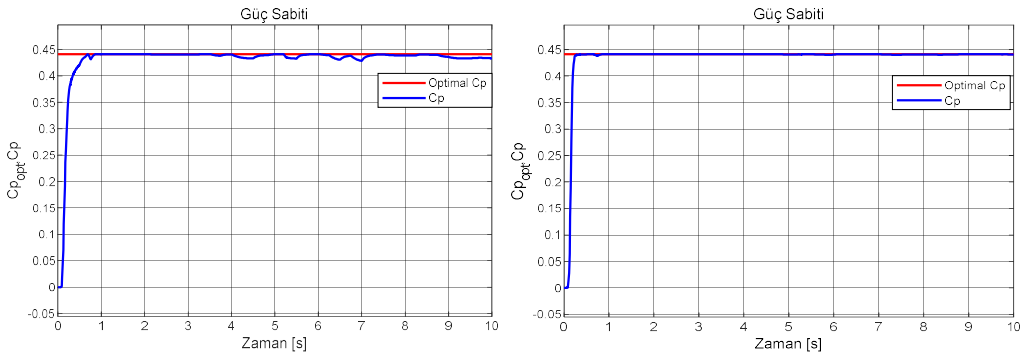
Şekil 8. a) Türbin güç sabitinin kanat ucu hızına göre değişimi b) Generatör açısal hızına göre elde edilebilecek en maksimum güç değerleri

Şekil 8. a'da KUHO değişimine göre güç sabitinin değişimi görülmektedir. Kullanılan türbin modeline göre optimum KUHO değeri yaklaşık 7.1 olarak gerçekleşmektedir. Güç sabitinin maksimum değeri ise 0,45 civarında gerçekleşmektedir. Şekil 8. b'de ise generatör hızının değişimine göre üretilebilecek maksimum güçler görülmektedir. Bu maksimum güçlerin değişimi de 1 ile 12 m/s arasında değişen hızlarda gerçekleşmektedir. Yaklaşık 2 MW'lık gücün 1800 d/d'da elde edilebileceği görülmektedir.



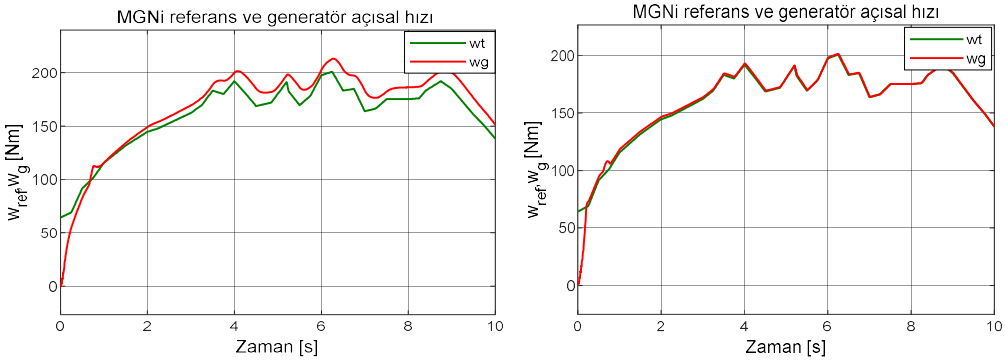
Şekil 9. a) Türbin güç sabitinin kanat ucu hızına göre değişimi b) Generatör açısal hızına göre elde edilebilecek en maksimum güç değerleri

Şekil 8'de verilen maksimum güç sabiti ve optimum KUHO oranına göre Şekil 9. a ve b'de elde edilebilecek güç değerleri ye almaktadır. Her bir rüzgâr hızı değişimi 1 ile 13 m/s arasında yer almaktadır. 2 MW'lık güce karşılık gelen rüzgâr hızı yaklaşık 11 m/s'de gerçekleşmektedir.



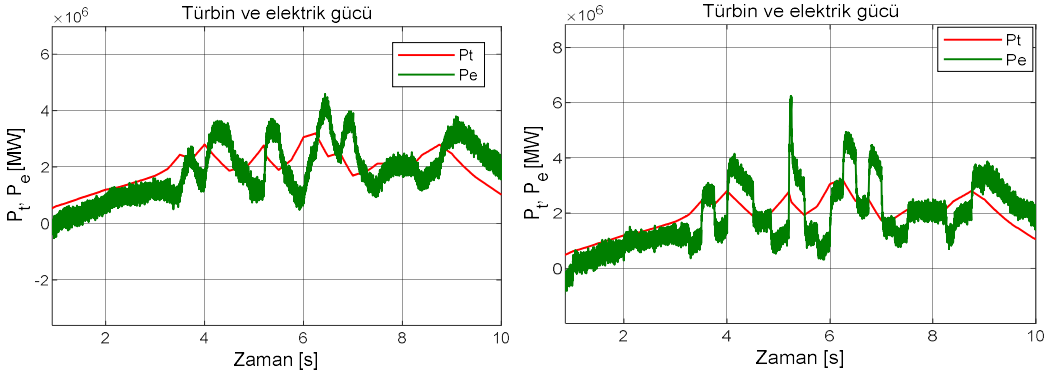
Şekil 10. MGNİ denetiminde güç sabiti değişimi a) Geleneksel PI denetleyici b) ADT2-BPID denetleyici

Şekil 10. a ve b'de MGNİ denetiminde geleneksel PI denetleyici ve ADT2-BPID denetleyici yoluyla rüzgar hızı değişimine göre güç sabiti değişimleri yer almaktadır. Şekillerden görüleceği üzere ADT2-BPID denetleyici performansına göre optimum güç katsayısı değerine daha hızlı ve hatasız olarak yakınsama sağlanmaktadır. Bu durumda güç sabiti doğrudan elde edilebilecek gücün içerisinde yer aldığı için elde edilebilecek güç artmaktadır.



Şekil 11. MGNİ denetiminde referans açısal hız ve generatör hızı a) Geleneksel PI denetleyici b) ADT2-BPID denetleyici

Şekil 11. a ve b'de MGNİ denetleyici yoluyla üretilen referans hız ve generatör hızı yer almaktadır. Buna göre geleneksel PI denetleyici ve ADT2-BPID denetleyici karşılaştırıldığında aralık değerli bulanık PID denetleyicinin PI denetleyiciye göre hatanın yaklaşık sıfır hata ürettiği görülmektedir. Bu durumda optimum güç katsayısının değerine yakınsama PI değerinden yüksek olmaktadır.



Şekil 12. MGNİ denetiminde stator akımların değişimi a) Geleneksel PI denetleyici b) ADT2-BPID denetleyici

Şekil 12 a ve b'de türbinden elde edilebilecek toplam güç ve şebekeye aktarılan güç değişimi verilmektedir. PI ve ADT2-BPID denetleyicinin kullanıldığı durumda rüzgar değişimine göre şebekeye aktarılan elektrik gücü, ADT2-BPID denetleyicisinin daha iyi dinamik performansa ve aktarılan gücün güç sabiti ve KUHO parametresinin daha yüksek olmasından dolayı daha yüksek güç aktarımına sahip olabileceği görülmektedir.

V. SONUÇLAR

Bu makalede, Matlab/Simulink ortamı kullanılarak aralık değerli tip-2 bulanık PID denetleyici tabanlı değişken hızlı sabit kanat açılı şebeke bağlantılı bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde maksimum güç noktasının izlenmesine ait çalışma yapılmıştır. Sistemin tamamı farklı rüzgâr hızları için test edilmiştir. MGNİ denetleyicisi, herhangi bir hızda rüzgârdan maksimum güç elde etme hedefine ulaşmıştır. Şebeke tarafı eviricisi rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik enerjisini şebekeye aktarmaktadır. Önerilen sistemin etkinliği, güç sabiti, kanat ucu hız oranı, hata değeri ve şebekeye aktarılan güç değeri gibi çeşitli parametreler benzetim sonuçlarına göre gözlemlenmiştir. Sonuçlardan ADT2-BPID denetleyicinin her bir rüzgâr değişimi durumunda geleneksel PI denetleyiciye göre daha üstün performans ortaya koyduğu görülmüştür. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi için parametreleri optimize edilmiş bulanık mantık denetleyici ve aralık değerli tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı MGNİ denetleyici tasarlamak gelecekteki çalışmalar olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] E. J. Novaes Menezes, A. M. Araújo, and N. S. Bouchonneau da Silva, "A review on wind turbine control and its associated methods," *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 945–953, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.297.

[2] N. Nguyen, S. Almasabi, and J. Mitra, "Impact of correlation between wind speed and turbine availability on wind farm reliability," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 3, pp. 2392–2400, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2896152.

[3] Y. Ni, B. Peng, J. Wang, F. Golnary, and W. Li, "A Short Review on the Time-Domain Numerical Simulations for Structural Responses in Horizontal-Axis Offshore Wind Turbines," *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16878, 2023, doi:

10.3390/su152416878.
[4] S. Y. Boo, S. A. Shelley, D. T. Griffith, and A. S. Escalera Mendoza, "Responses of a Modular Floating Wind TLP of MarsVAWT Supporting a 10 MW Vertical Axis Wind Turbine," *Wind*, vol. 3, no. 4, pp. 513–544, 2023, doi: 10.3390/wind3040029.
[5] M. Karabacak, F. Kılıç, Y. Cantaş, Ö. Atmaca, and T. V. Küçük, "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Ucu Hız Oranı Tabanlı Maksimum Güç İzleme Denetimi; Kapsamlı Bir Tasarım," *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, pp. 1–1, 2017, doi: 10.16984/saufenbilder.327114.
[6] H. Benbouhenni, N. Bizon, M. I. Mosaad, I. Colak, A. B. Djilali, and H. Gasmi, "Enhancement of the power quality of DFIG-based dual-rotor wind turbine systems using fractional order fuzzy controller," *Expert Syst. Appl.*, vol. 238, no. PA, p. 121695, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121695.
[7] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman, and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, no. type 1, pp. 10857–10878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964896.
[8] S. M. Tripathi, A. N. Tiwari, and D. Singh, "Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: A technology review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1288–1305, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.060.
[9] R. Kumar, H. P. Agrawal, A. Shah, and H. O. Bansal, "Maximum power point tracking in wind energy conversion system using radial basis function based neural network control strategy," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 36, no. February, p. 100533, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.100533.
[10] M. Karabacak, "A new perturb and observe based higher order sliding mode MPPT control of wind turbines eliminating the rotor inertial effect," *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 807–827, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.10.079.
[11] H. Fathabadi, "Novel high-efficient unified maximum power point tracking controller for hybrid fuel cell/wind systems," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 1498–1510, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.114.
[12] H. H. H. Mousa, A. R. Youssef, and E. E. M. Mohamed, "State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106598, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106598.
[13] R. Datta and V. T. Ranganathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 1, pp. 163–168, 2003, doi: 10.1109/TEC.2002.808346.
[14] S. Ademi and M. Jovanovic, "High-efficiency control of brushless doubly-fed machines for wind turbines and pump drives," *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 120–132, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.015.
[15] J. Chen *et al.*, "Adaptive active fault-tolerant MPPT control of variable-speed wind turbine considering generator actuator failure," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 143, no. July, p. 108443, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108443.
[16] M. Nasiri, J. Milimonfared, and S. H. Fathi, "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 892–900, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.055.
[17] E. Chetouani, Y. Errami, A. Obbadi, and S. Sahnoun, "Self-adapting PI controller for grid-connected DFIG wind turbines based on recurrent neural network optimization control under unbalanced grid faults," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. PA, p. 108829, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108829.
[18] V. Reyes, J. J. Rodriguez, O. Carranza, and R. Ortega, "Review of mathematical models of both the power coefficient and the torque coefficient in wind turbines," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2015-Septe, no. 6, pp. 1458–1463, 2015, doi: 10.1109/ISIE.2015.7281688.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçları İçin Veriye Dayalı Kontrol

Atakan YILDIZ[a], Leyla GÖREN-SÜMER[b]*

[a]İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b]İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** yildizat21@itu.edu.tr**

ÖZET

Dört rotorlu insansız hava araçları doğası gereği doğrusal değildir, bu da onların modellenmesini ve kontrol edilmesini zorlaştırır. Bu çalışmada, dört rotorlu insansız hava aracının yükseklik ve duruş değişkenlerine ilişkin matematiksel modelinin veriye dayalı yeni bir yöntem olan dinamik mod ayrıştırması (DMD) metodu ile elde edilmesi ve bu doğrusal model kullanılarak sistemin doğrusal karesel regülatör (LQR) teknikleri ile kontrol edilmesi problemi ele alınmıştır. Literatürde dinamik mod ayrıştırması ile kontrol (DMDc) olarak geçen bu yöntem, karmaşık ve yüksek boyutlu sistemlerin dinamiklerini yalnızca anlık ölçümler kullanarak yeniden oluşturan, veri odaklı DMD algoritmasına dayanmaktadır. Bu çalışmada herhangi bir doğrusallaştırma tekniği kullanılmadan sadece doğrusal olmayan sistemin zamana bağlı anlık ölçümleri kullanılarak DMD yöntemi ile sistemin durum uzay modeli elde edilmiştir. Elde edilen durum uzay modeli kullanılarak doğrusal karesel regülatör tekniğiyle durum geri beslemeli bir kontrolör tasarımı yapılmış ve maliyet fonksiyonunu en aza indiren kontrolör kazançları hesaplanmıştır. DMD yöntemi ile elde edilen durum uzay modelinin doğrusal olmayan model ile benzer sonuçlar verdiği sayısal deneyler ile gösterilmiştir. DMDc yaklaşımı gereği DMD ile elde edilen doğrusal model kullanılarak tasarlanan doğrusal karesel regülatörün başarılı olduğu yine sayısal deneylerle gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *DMD, DMDc, Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı, LQR, Veriye Dayalı Kontrol*

Data Driven Control for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles

Atakan YILDIZ[a], Leyla GÖREN-SÜMER[b]*

[a]İstanbul Technical University, Institute of Science, Department of Control and Automation Engineering, İstanbul/Türkiye.
[b]İstanbul Technical University, Department of Control and Automation Engineering, İstanbul/Türkiye.
* **Corresponding Author:** yildizat21@itu.edu.tr**

ABSTRACT

Quadrotor unmanned aerial vehicles are inherently nonlinear, which makes their modeling and control challenging. In this study, the problem of obtaining the mathematical model of a quadrotor unmanned aerial vehicle's altitude and attitude variables using the data driven method called dynamic mode decomposition (DMD), and controlling the system using this linear model with linear quadratic regulator (LQR) techniques have been addressed. This method, referred to as Dynamic Mode Decomposition with Control (DMDc) in the literature, is based on the data driven DMD algorithm, which recreates the dynamics of complex and high dimensional systems using only instantaneous measurements. The study, the state space model of the system was obtained with the DMD method, using only time dependent instantaneous measurements of the nonlinear system without using any linearization techniques. Using the obtained model, state feedback controller was designed with the LQR technique and the controller gains that minimize the cost function were calculated. It has been shown through numerical experiments that the state space model obtained by the DMD method gives similar results to the nonlinear model. According to the DMDc approach, it has been shown through numerical experiments that the LQR designed using the linear model obtained with DMD is successful.

Keywords: *DMD, DMDc, Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle, LQR, Data Driven Control*

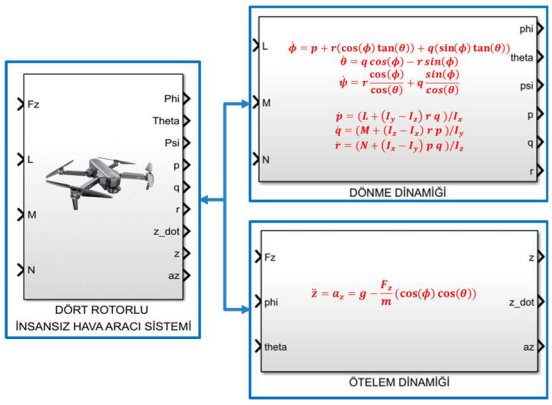
I. GİRİŞ

Dört rotorlu insansız hava araçları, son yıllarda hızla gelişen teknolojiyle birlikte birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Bu araçlar, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup askeri operasyonlardan tarım uygulamalarına kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu araçların işlevlerini yüksek doğruluk ve hassasiyette yerine getirebilmesinin temel koşullarından biri başarılı bir kontrolcüye sahip olmalarıdır. Ancak, bu hava araçlarının karmaşık dinamik yapılara sahip olması ve doğası gereği doğrusal olmaması onların modellenmesini ve kontrol edilmesini zorlaştırır.

Veriye dayalı kontrol (Data Driven Control), görece karmaşık sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için son yıllarda geliştirilen önemli bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım herhangi bir matematiksel modele ihtiyaç duymadan sadece sistem giriş ve çıkışlarına ait verileri kullanarak sistemin dinamiklerinin modellenmesine olanak tanır. Sadece giriş-çıkış verilerinden elde edilen bu model aynı zamanda sisteme başarılı bir kontrolcü tasarlamak içinde gereklidir.

Bu çalışmada, dört rotorlu insansız hava aracı sistemi üzerine çalışılmıştır. Sadece sisteme ait uçuş verileri kullanılarak yükseklik ve duruş değişkenlerinin kontrol edilmesi problemi ele alınmıştır. Burada, dört rotorlu insansız hava aracının yükseklik ve duruş değişkenlerine ilişkin matematiksel modeller veriye dayalı yeni bir yöntem olan dinamik mod ayrıştırması ile kontrol (DMDc) metodu kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan ve kararsız dört rotorlu hava aracı sisteminin kontrolü için DMDc metoduyla elde edilen doğrusal modeller kullanılarak doğrusal karesel regülatör (LQR) teknikleriyle durum geri beslemeli bir kontrolör tasarımı yapılmıştır.

II. DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI SİSTEMİ



Şekil 1. Doğrusal olmayan dört rotorlu insansız hava aracı sistemine ait Matlab blokları

Bu çalışmada verinin toplanacağı sistemi oluşturmak amacıyla sisteme ait kinematik ve dinamik ilişkiler kullanılarak dört rotorlu insansız hava aracı sisteminin dönme ve öteleme dinamiğine ait denklemler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Dönme dinamiğine ait denklemler:

$$\dot{\phi} = p + r(\cos(\phi)\tan(\theta)) + q(\sin(\phi)\tan(\theta)) \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = q\cos(\phi) - r\sin(\phi) \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = r\frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} + q\frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (3)$$

$$\dot{p} = \frac{L+(I_y-I_z)\,r\,q}{I_x} \quad (4)$$

$$\dot{q} = \frac{M+(I_z-I_x)\,r\,p}{I_y} \quad (5)$$

$$\dot{r} = \frac{N+(I_x-I_y)\,p\,q}{I_z} \quad (6)$$

Öteleme dinamiğine ait denklem:

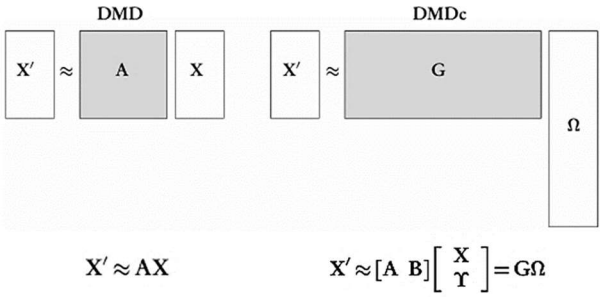
$$\ddot{z} = a_z = g - \frac{F_z}{m(\cos(\phi)\cos(\theta))} \quad (7)$$

Elde edilen denklemler kullanılarak Matlab/Simulink ortamında doğrusal olmayan dört rotorlu insansız hava aracı modeli oluşturulmuştur. Bu modeli oluşturmadaki amaç; DMDc yöntemini uygulayarak doğrusal model elde edebilmek için doğrusal olmayan sistemden veri toplamak ve tasarlanan kontrolörü doğrusal olmayan sistem üzerinden test edebilmektir.

III. DİNAMİK MOD AYRIŞTIRMASI İLE KONTROL (DMDC)

Bu çalışmada dört rotorlu insansız hava aracı sistemine ait yükseklik ve duruş değişkenlerinin kontrol edilmesi problemini çözmek için literatürde dinamik mod ayrıştırması ile kontrol (DMDc) olarak geçen veriye dayalı yeni bir yöntem kullanılmıştır. Dinamik mod ayrıştırması ile kontrol (DMDc), karmaşık ve yüksek boyutlu sistemlerin dinamiklerini yalnızca anlık ölçümler kullanarak yeniden oluşturan, veri odaklı DMD algoritmasına dayanmaktadır. DMDc ise DMD'nin temel prensiplerini kullanarak sistemdeki dinamikleri analiz etmek için geliştirilmiş bir tekniktir.

Dinamik mod ayrıştırması (DMD), yüksek boyutlu verilerden dinamik sistemlerin modellenmesi için kullanılan güçlü ve yeni bir tekniktir. DMD yöntemi, karmaşık akışları basit bir temsile ayrıştırmaya yönelik bir yöntem olarak akışkanlar dinamiği topluluğunda ortaya çıkmıştır.



Şekil 2. DMD ve DMDc metodu [1]

Şekil 2 de de görüldüğü gibi, DMDc yöntemi DMD den farklı olarak sistemin anlık ölçüm verilerine ek harici giriş sinyallerini de kullanarak sistemin dinamiklerini ve kontrol edilebilirlik özelliklerini belirler.

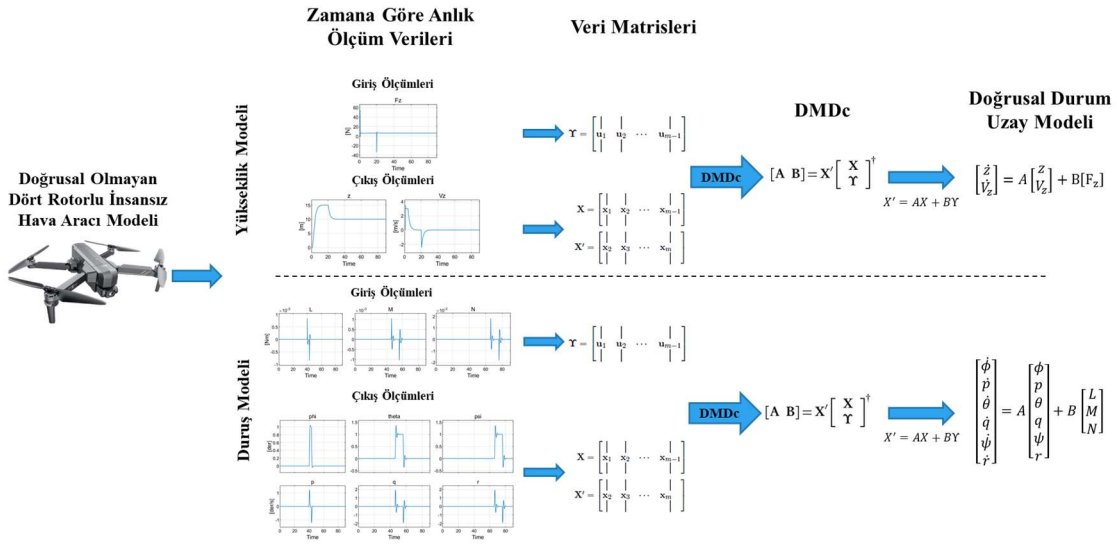
A. Dinamik Mod Ayrıştırması ile Kontrol Uygulama Adımları

$$X' \approx AX + BY \tag{8}$$

Bir durum uzay modelinde (8), B matrisinin de bilinmediği durumda hem A hem B matrisi aynı anda tanımlanması gerekir. Bu durumda dinamikler şu şekilde yeniden düzenlenir (9).

$$X' \approx [A\ B] \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = G\ \Omega \tag{9}$$

Sistemin dinamiklerini elde etmek, A ve B matrislerini bulmak için DMDc yöntemini uygulama adımları Şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 3. DMDc uygulama adımları

Şekil 3 de de görüldüğü gibi ilk olarak sistem dinamikleri ve kontrol sinyalleri için doğrusal olmayan dört rotorlu insansız hava aracı sisteminden veri toplanır, Ω arttırılmış veri matrisini elde etmek için anlık veri matrisleri X ve Y oluşturulur.

$$\Omega = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \tag{10}$$

Sonrasında, DMDc ile $G = [A\ B]$ arttırılmış operatör matrisini elde etmek için $\Omega = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$ arttırılmış veri matrisine tekil değer ayrıştırması (SVD) uygulanır.

$$\Omega \approx \tilde{U}\tilde{\Sigma}\tilde{V}^* = \begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \end{bmatrix} \tilde{\Sigma}\tilde{V}^* \tag{11}$$

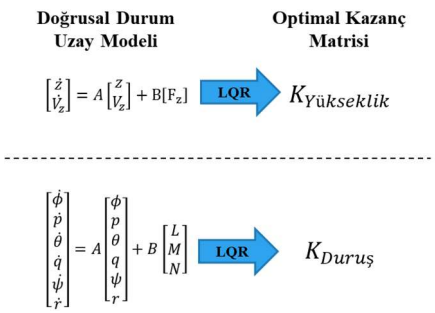
Son olarak A ve B matrisleri (12) ve (13) deki eşitlikler kullanılarak elde edilir ve Şekil 3 deki gibi yükseklik ve duruş değişkenleri için doğrusal durum uzay modelleri bulunur.

$$\mathrm{A} = X'\tilde{V}\tilde{\Sigma}^{-1}\tilde{U}_1^* \tag{12}$$

$$\mathrm{B} = X'\tilde{V}\tilde{\Sigma}^{-1}\tilde{U}_2^* \tag{13}$$

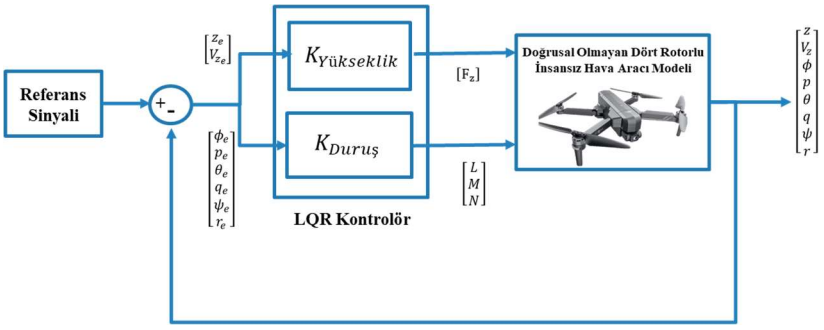
IV. Doğrusal Karesel Regülatör (LQR)

Doğrusal olmayan kararsız dört rotorlu insansız hava aracı sisteminin kararlılığını garanti eden ve optimal sonucu veren kontrolör tasarlamak için DMDc metodu ile elde edilen doğrusal model kullanılarak doğrusal karesel regülatör (LQR) teknikleri ile durum geri beslemeli bir kontrolör tasarımı yapılmıştır. Durum geri beslemeli kontrolör tasarımında temel amaç kazanç (K) matrisinin bulunmasıdır.



Şekil 4. Yükseklik ve duruş değişkenleri için LQR uygulama adımları

Yükseklik ve duruş değişkenlerine ait doğrusal durum uzay modelleri kullanılarak LQR teknikleri ile her bir model için optimal kazançlar Şekil 4 deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5. LQR kontrolörlü doğrusal olmayan dört rotorlu insansız hava aracı sistemine ait blok diyagram

LQR kontrolörlü doğrusal olmayan dört rotorlu insansız hava aracı sistemine ait blok diyagram Şekil 5 deki gibi oluşturulmuş ve kontrol sinyali (13) aşağıdaki gibi tasarlanmıştır.

$$u(t) = -Kx_e(t) = -K\left(x(t) - x_{ref}(t)\right) \tag{13}$$

LQR yönteminde bir optimizasyon problemi çözülerek K matrisi elde edilmektedir. Optimal geri besleme katsayıları aşağıdaki gibi bir maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ile bulunmaktadır.

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty (x^T Q x \; + \; u^T R u)dt \tag{14}$$

Maliyet fonksiyonundaki (14) durum (Q) ve giriş (R) ağırlık matrisleri, uygun kazanç matrisleri elde edebilmek için isterlere uygun olarak eşitlik (15) ve (16)'daki gibi seçilmiştir.

$$Q_{yükseklik} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \;\; R_{yükseklik} = [4] \tag{15}$$

$$Q_{duruş} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \; R_{duruş} = \begin{bmatrix} 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix} \tag{16}$$

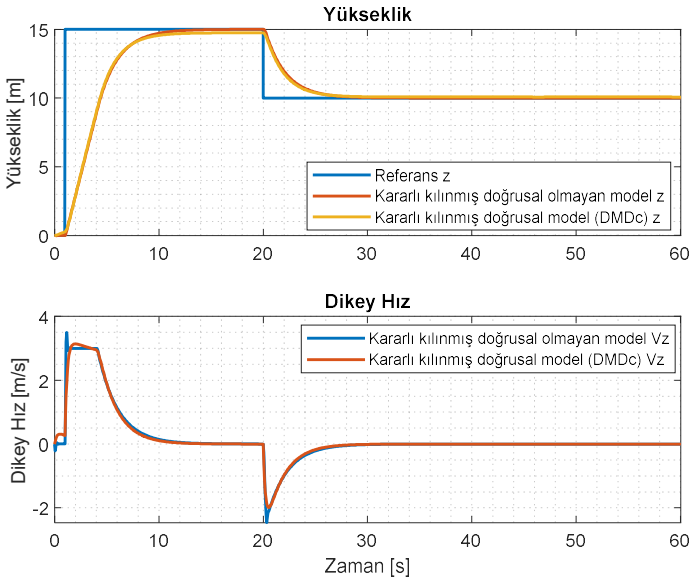
Optimal kontrol kazançlar Matlab'in 'lqr(A, B, Q, R)' fonksiyonu ile aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$K_{yükseklik} = [0.337 \quad 0.9768], \tag{17}$$

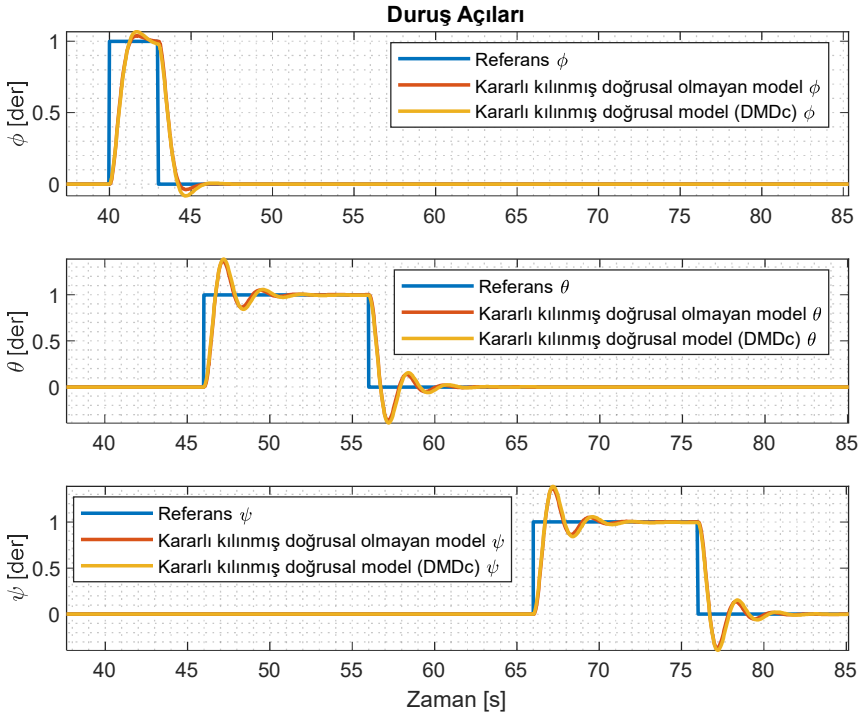
$$K_{duruş} = \begin{bmatrix} 0.0698 & 0.0374 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0995 & 0.0436 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1406 & 0.0684 \end{bmatrix} \tag{18}$$

V. SONUÇLAR

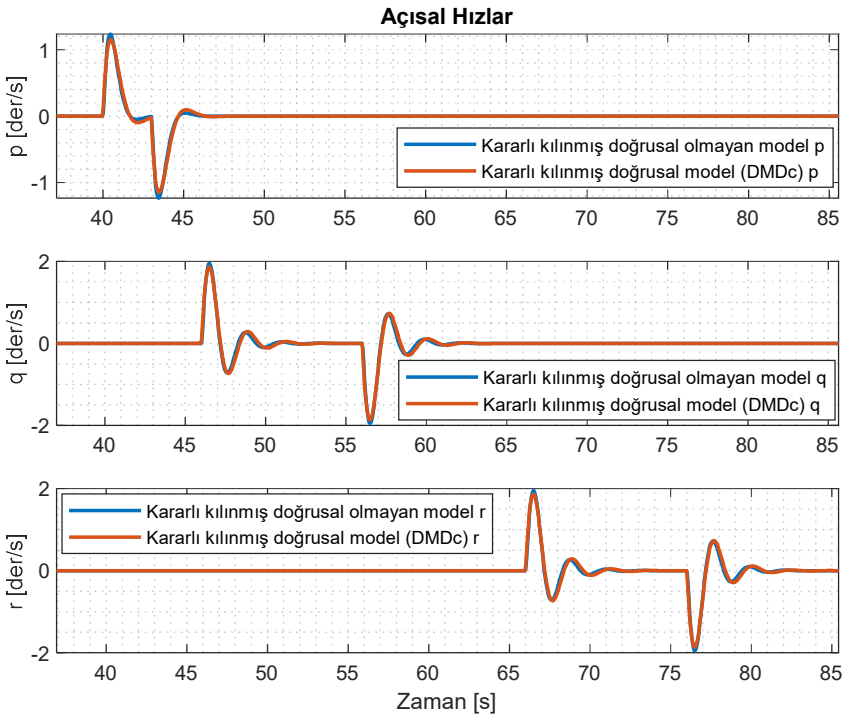
Bu bölümde öncelikle doğrusal olmayan sistem çıktıları ve DMDc yöntemiyle elde edilmiş doğrusal model çıktıları karşılaştırılmıştır. Ancak açık çevrimli sistem hızlı bir şekilde kararsızlığa gittiği için karşılaştırma yapılmadan önce, verilerin toplandığı doğrusal olmayan sistem bir kontrolör kullanılarak kararlı kılınmış ve DMDc yöntemiyle bu kararlı kılınmış sistemin doğrusal modeli elde edilmiştir. Sonrasında hem doğrusal model hem de verilerin toplandığı doğrusal olmayan sisteme aynı girişler uygulanmış ve elde edilen çıktılar Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 de verilmiştir. DMDc yöntemiyle elde edilmiş doğrusal modele ait çıktıların doğrusal olmayan sistem ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumda, doğrusal olmayan sistemin LQR teknikleri ile kontrolcü tasarımı yapılırken DMDc ile elde edilmiş doğrusal durum uzay modelinin kullanılabileceği sonucuna varılmış ve LQR tasarımında kullanılmak üzere kararlı kılınmış sistem modelinden açık çevrimli sistemin durum uzay modeli elde edilmiştir.



Şekil 6. Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve kararlı kılınmış DMDc ile elde edilen doğrusal model için yükseklik ve dikey hız grafikleri

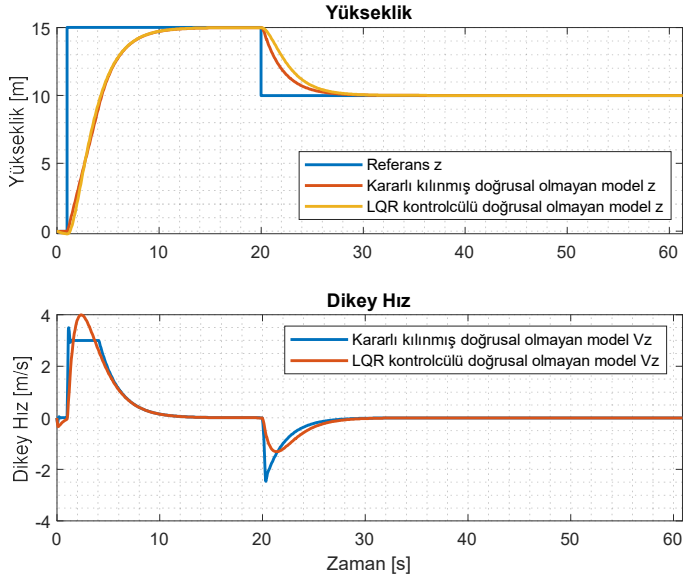


Şekil 7.Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve kararlı kılınmış DMDc ile elde edilen doğrusal model için duruş açılarına ait grafikler

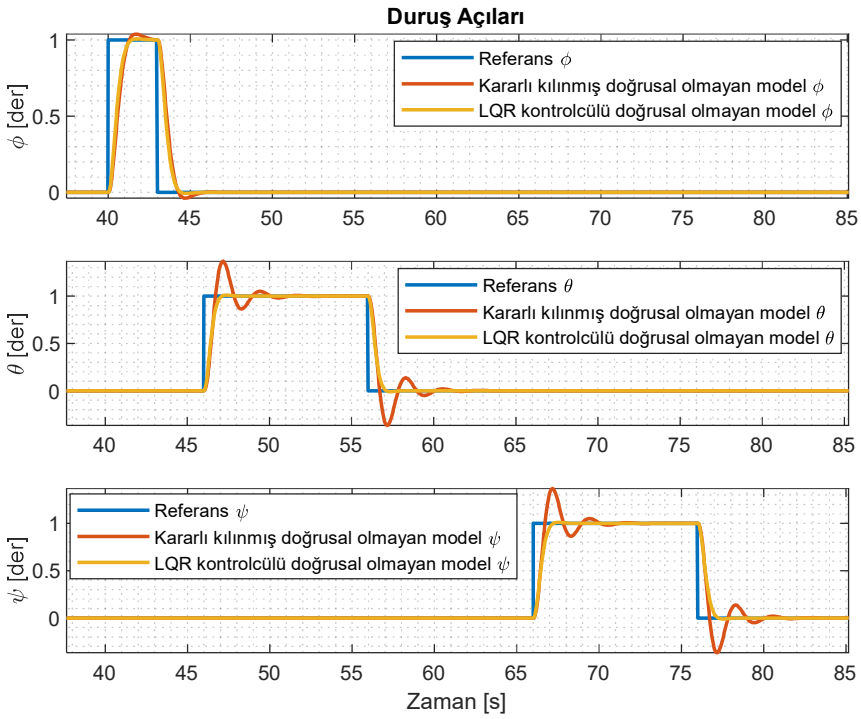


Şekil 8. Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve kararlı kılınmış DMDc ile elde edilen doğrusal model için açısal hızlara ait grafikler

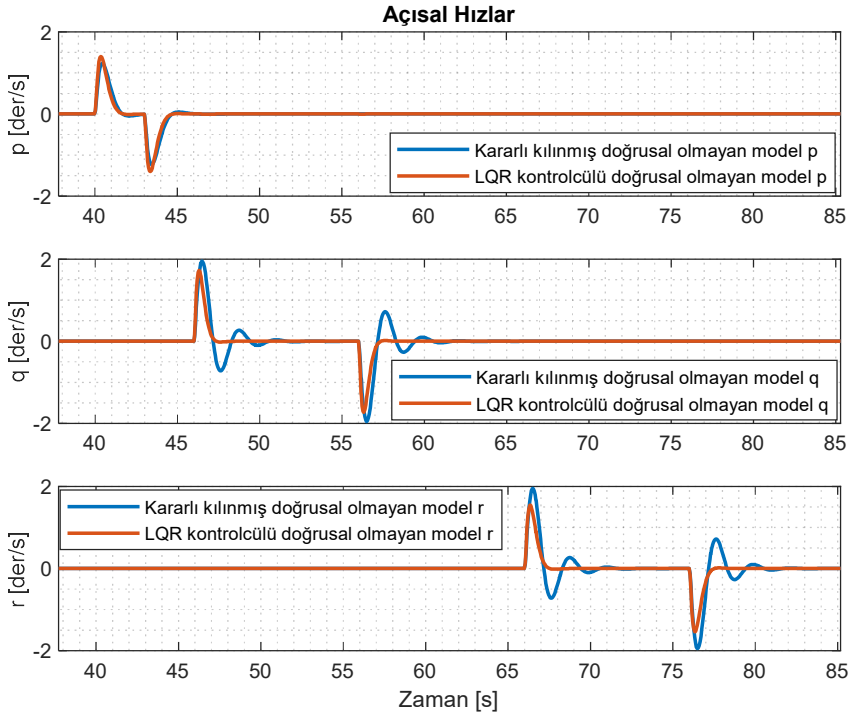
Son olarak ön kontrolcüyle kararlı kılınmış doğrusal olmayan sistem çıktısı ve DMDc yöntemiyle bulunmuş doğrusal model kullanılarak LQR teknikleriyle kontrol edilmiş doğrusal olmayan sisteme ait çıktılar karşılaştırılmıştır.
Şekil 10 da görüldüğü gibi duruş açılarından dikilme (θ) ve yönelme (ψ) için LQR teknikleriyle kontrol edilmiş doğrusal olmayan sisteme ait çıktıların aşım yapmadan referans sinyali takip etti görülmektedir. Ayrıca Şekil 11 de LQR teknikleriyle kontrol edilmiş doğrusal olmayan sisteme ait dikilme açısal hız (q) ve yönelme açısal hız (r) çıktılarının daha az salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 9. Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve LQR kontrolcülü doğrusal olmayan model için yükseklik ve dikey hız grafikleri



Şekil 10. Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve LQR kontrolcülü doğrusal olmayan model için duruş açılarına ait grafikler



Şekil 11. Kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve LQR kontrolcülü doğrusal olmayan model için açısal hızlara ait grafikler

Yapılan sayısal deneylerden, ön kontrolcü ile kararlı kılınmış doğrusal olmayan model ve DMDc yöntemiyle elde edilmiş doğrusal model çıktılarının benzer sonuçlar verdiğini ve DMDc yöntemiyle bulunmuş doğrusal model kullanılarak LQR teknikleriyle kontrol edilmiş doğrusal olmayan sistemin performansının başarılı olduğunu söyleyebiliriz.

KAYNAKLAR

[1] Kutz, J. N., Brunton, S. L., Brunton, B. W., & Proctor, J. L. (2016). Dynamic mode decomposition: data-driven modeling of complex systems. Society for Industrial and Applied Mathematics.

[2] Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2022). Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control. Cambridge University Press.

[3] Petukhova, E. (2022). Master Thesis in Computer Science (Doctoral dissertation, University of Passau).

[4] Öznurlu, C. (2022). Data-Driven Model Discovery and Control of Lateral-Directional Fighter Aircraft Dynamics (Master's thesis, Middle East Technical University).

[5] Ahmed, S. F., Kadir, K., & Joyo, M. K. (2017). LQR based controller design for altitude and longitudinal movement of quad-rotor.

[6] Okyere, E., Bousbaine, A., Poyi, G. T., Joseph, A. K., & Andrade, J. M. (2019). LQR controller design for quad-rotor helicopters. The Journal of Engineering, 2019(17), 4003-4007.

[7] Ahmad, F., Kumar, P., Bhandari, A., & Patil, P. P. (2020). Simulation of the Quadcopter Dynamics with LQR based Control. Materials Today: Proceedings, 24, 326-332.

[8] Sabatino, F. (2015). Quadrotor control: modeling, nonlinearcontrol design, and simulation.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Farklı Çekme Test Numune Boyutlarının Çekme Test Sonuçlarına Etkisinin İncelenmesi

Berkay Oral[a], Fulya Eyçin[b]*

[a]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
[b]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
*Sorumlu Yazar: berkay.oral@doktas.com

ÖZET

Çekme testi ile numuneler üzerinden nihai ürünlerin malzeme karakteristiklerine ve üretim kalitesine bağlı olarak malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerleri tespit edilmektedir. Çekme testleri birçok farklı şekilde ve ölçüde numune boyutları ile yapılabilmektedir. Döktaş Dökümcülük Jant tesisinde alüminyum döküm alaşımları DIN 50125:2009 standardına uygun olarak form A 6x30, 6mm=Do (numune çapı), 30mm=Lo (numune ilk boyu) çekme numuneleri hazırlanmaktadır. Müşteri istek ve gerekliliğine bağlı olarak form A 5x25 ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerlerine etkisinin form A 6x30'a göre değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada AlSi7Mg0,3 ısıl işlemli alüminyum döküm alaşımı kullanılmış olup aynı döküm ve ısıl işlem şartlarındaki döküm partisi numuneleri kullanılıp çekme testi yapılmıştır. Do=6mm numunelerin Rm ,Rp0,2 , %e değişimi, Do=5mm numunelerin Rm, Rp0,2, % e değişimi, Lo=25mm numunelerin Rm, Rp0,2 ,%e değişimi, Lo=30mm numunelerin Rm, Rp0,2, %e değişimi, çekme test sonuçları, Minitab yazılımı kullanılarak ANOVA hipotez test yapılarak istatistiksel analiz edilip anlamlılığı doğrulanmış, normal dağılım gösterdiği görülmüş ve yorumlanmıştır.

Sonuç olarak form A 5x25 ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemetlerine etki edip, akma mukavemetlerine etki etmediği ve Form A 6x30'a göre % uzama değerleri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede elde edilen verilerin ve sonuçların güvenilirliği ve verimliliği arttırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Akma Mukavemeti, AlSi7Mg0,3, Çekme Mukavemeti, Çekme Testi, Uzama Miktarı*

The Investigation of the Effect of Different Tensile Test Specimen Sizes on Tensile Test Results

Berkay Oral[a], Fulya Eyçin[b]*

[a]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
[b]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
* Corresponding Author: berkay.oral@doktas.com

ABSTRACT

With tensile test, tensile strength, yield strength and %elongation of material are determined on samples, depending on material characteristics and production quality of final products. Tensile tests can be performed in many different shapes and sizes of sample sizes. Döktaş Dökümcülük Wheel facility aluminum tensile test samples are prepared in accordance with DIN 50125:2009 standard in Form A6x30, 6mm=Do (diameter), 30mm=Lo (initial length). Depending on customer requirements, it was aimed to examine effect of the samples in form A5x25 on the tensile strength, yield strength and %elongation compared to form A6x30.

In this study, AlSi7Mg0,3 heat treated aluminum casting alloy was used and tensile tests were performed using castin batch samples which are in the same casting and heat treatment conditions. Rm, Rp0,2, %e change of Do=6mm and Do=5mm samples, Lo=25mm and Lo=30mm samples, tensile test results were

statistically analyzed by Minitab software with ANOVA hypothesis test, confirmation of significance, show normal distribution and was interpreted.

As a result of the study, it was determined that Form A5x25 sizes affected the tensile strength, but not the yield strength and the % elongation were higher than Form A6x30. In this way, obtained data and results reliability and efficiency were increased.

Keywords: *AlSi7Mg0.3, Elongation, Tensile Strength, Tensile Test, Yield Strength*

I. GİRİŞ

Çekme testi ile numuneler üzerinden nihai ürünlerin malzeme karakteristiklerine ve üretim kalitesine bağlı olarak malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerleri tespit edilmektedir. Çekme testleri birçok farklı şekilde ve ölçüde numune boyutları ile yapılabilmektedir. Döktaş Dökümcülük Jant tesisinde alüminyum döküm alaşımları DIN 50125:2009 standardına uygun olarak form A 6x30, 6mm=Do (numune çapı), 30mm=Lo (numune ilk boyu) çekme numuneleri hazırlanmaktadır. Müşteri istek ve gerekliliğine bağlı olarak form A 5x25 ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerlerine etkisinin form A 6x30'a göre değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada AlSi7Mg0,3 ısıl işlemli alüminyum döküm alaşımı kullanılmış olup aynı döküm ve ısıl işlem şartlarındaki döküm partisi numuneleri kullanılıp çekme testi yapılmıştır. Do=6mm numunelerin Rm, Rp0,2 , %e değişimi, Do=5mm numunelerin Rm, Rp0,2, % e değişimi, Lo=25mm numunelerin Rm, Rp0,2 ,%e değişimi, Lo=30mm numunelerin Rm, Rp0,2, %e değişimi, çekme test sonuçları, Minitab yazılımı kullanılarak ANOVA hipotez test yapılarak istatistiksel analiz edilip anlamlılığı doğrulanmış, normal dağılım gösterdiği görülmüş ve yorumlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

A. Malzeme ve Döküm Süreci

Bu çalışmada *AlSi7Mg0,3* ısıl işlemli malzeme kullanılmıştır.

Ergitilen alaşım gaz giderme işlemi (Şekil 1) sonrasında içeren jantlar alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2). Alçak basınç döküm yöntemi, otomotiv endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Jant ve motor bloğu imalatında tercih edilmektedir. Alçak basınçlı dökümde (LPDC) et kalınlığı fazla, homojen simetrideki, büyük parçaların seri bir şekilde ve düşük porozite oranlarında üretilmesine imkân vermektedir. Üretilen jantlardan A 5x25 ve A 6x30 boyutlarında çekme çubukları çıkartılmıştır.



Şekil. 1 Al ergiyik gaz giderme işlemi



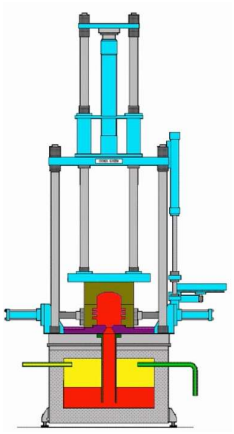
Şekil. 2 Alçak Basınç Döküm Tezgâhı



Şekil. 3 Döküm Jant

Tablo 1. *AlSi7Mg0,3 Kimyasal Kompozisyon*

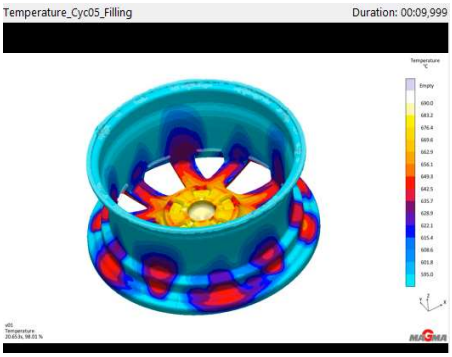
ALLOY	CHEMICAL COMPOSITION (%) *(1)*									
	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti
Al-Si7Mg0,3	6,5 7,5	0,25 0,40	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,20



Şekil. 4 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi



Şekil. 5 Alçak Basınçlı Döküm, Jant kalıptan çıkarken.



Şekil. 6 Alçak Basınçlı Döküm Jant Simülasyonu.

Alçak basınçlı döküm (LPDC) simülasyonundan da görüldüğü üzere döküm sırasında jantların göbek bölgeleri en geç katılaşır ve en son soğur. Döküm prosesi sonrasında Jantların bölgelerine göre ayarlanan başlangıç ve bitiş zamanlarında soğutmalar devreye girerek (hava, hava+su veya su ile soğutma) soğutma süreci tamamlanır. Kalıptan çıkan jantta en sıcak bölgede göbek bölgesidir.

B. Boya Süreci

Dökülen jantlar, talaşlı imalat işlemlerinden de geçirildikten sonra müşteri isteklerine göre boyama işlemlerine tabi tutulmaktadır. Boyama işlemleri elektrostatik toz boya 1.kaplama ve yaş boya 2.kaplama işlemlerinden geçirilmektedir. Jant, ebat ve bölgelerine bağlı olarak toz boya prosesinde 170-200°C, yaş boya prosesinde ise 140-170 ^{o}C' sıcaklıklara ulaşmaktadır. Jantın boya prosesinden geçirilmesinin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir.



Şekil. 7 Elektrostatik Toz Boya



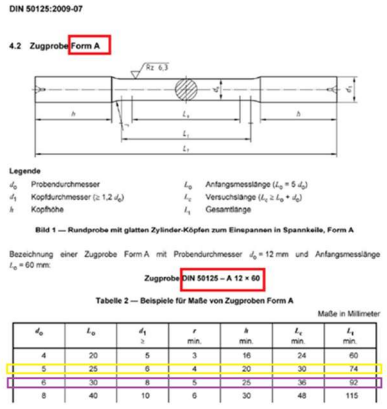
Şekil. 8 Yaş Boya Uygulaması

C. Çekme Testi

Çekme testleri EN ISO 6892-1 standartlarına göre Shimadzu Çekme Test cihazında Form A 6x30 mm'lik 6mm=Do (numune çapı), 30mm=Lo (numune ilk boyu) numuneler kullanılarak yapılmaktadır.[3] Bu çalışmada form A 5x25 5mm=Do (numune çapı), 25mm=Lo (numune ilk boyu) ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerlerine etkisinin form A 6x30'a göre değişimi incelenmiştir.



Şekil. 9 Çekme Test


DIN 50125:2009-07

4.2 Zugprobe Form A

Bild 1 — Rundprobe mit glatten Zylinder-Köpfen zum Einspannen in Spannkeile, Form A

Bezeichnung einer Zugprobe Form A mit Probendurchmesser d_0 = 12 mm und Anfangsmesslänge L_0 = 60 mm:

Zugprobe DIN 50125 – A 12 × 60

Tabelle 2 — Beispiele für Maße von Zugproben Form A

Maße in Millimeter

d_0	L_0	d_1 ≈	r min.	h min.	L_c min.	L_t min.
4	20	5	3	16	24	60
5	25	6	4	20	30	74
6	30	8	5	25	36	92
8	40	10	6	30	48	115

Şekil. 10 DIN 50125:2009-07 Form A tipi Çekme Numune

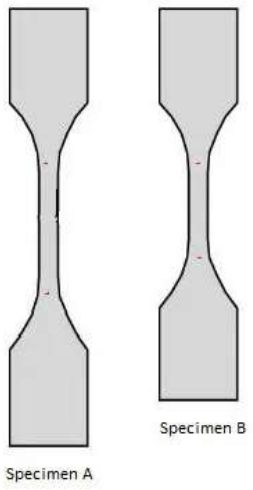
Şekil 10.da DIN 50125:2009-07 Form A tipi Çekme Numune Ölçüleri verilmiştir. Numuneler bu standartta göre Form A5X25 do=5mm Lo=25mm ve Form A6X30 do=6mm Lo=30mm olarak hazırlanmıştır. [9]

Bu çalışma ile aynı standart malzemenin farklı geometrilerde veya boyutlarda test edilmesi durumunda çekme özelliklerinin etkilenip etkilenmediği tartışılacaktır. Belirli bir kesit alanı ve herhangi bir ölçü uzunluğu için, farklı numune geometrilerinin standart malzemelerin nihai çekme mukavemeti ve akma mukavemeti üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Bununla birlikte, farklı ölçü uzunlukları ve kesit alanları, aşağıda açıklanan belirli özellikler üzerinde değişen etkilere sahip olacaktır. *[1,7,6]*

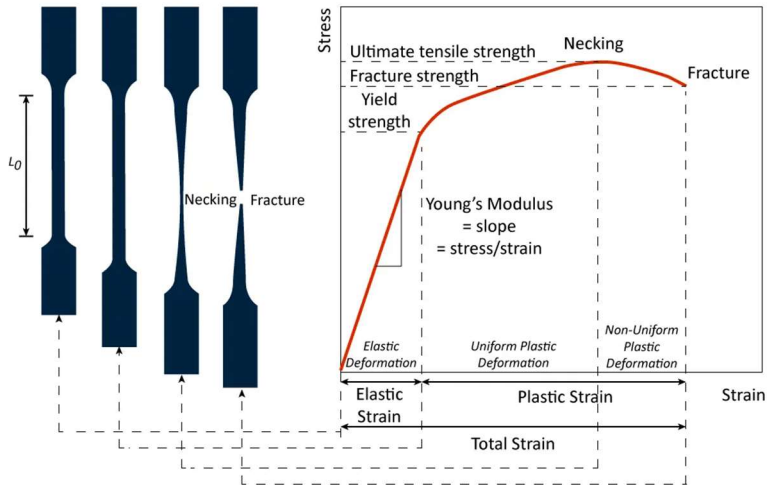
C.1 Farklı Ölçü Uzunluklarının Çekme Testine Etkisi

Aynı malzemeden yapılmış, iki farklı ölçü uzunluğuna sahip iki numune karşılaştırılmıştır, (Şekil 11)

Çekme testi başlatıldığında ve Şekil 12 da görüleceği üzere Numune A veya Numune B çekildiğinde, gerinim, maksimum kuvvete ulaşılan ve boyun vermenin başladığı noktaya kadar ölçüm uzunluğu boyunca tekdüzedir. Bu noktaya kadar her malzemedeki esneme aynıdır. Daha sonra aşağıdaki gerilim-gerinim eğrisinde gösterildiği gibi kuvvet düşmeye başlayacak ve alandaki azalma artık malzemedeki esneme miktarıyla orantılı olmayacaktır



Şekil.11 Farklı ölçü uzunluklarına sahip iki numune örneği



Şekil. 12 Çekme testi sırasında sünek bir numunenin şekli değişir

Boyun verme bölgesi, Numune A'nın 2 inçlik ölçü uzunluğundaki kısımla karşılaştırıldığında, Numune B'nin 1 inçlik ölçü uzunluğunun çok daha büyük bir bölümünü kaplayacaktır. Test bittiğinde ve numunelerin iki kırığı bir araya getirildiğinde, daha küçük ölçü uzunluğuna sahip Numune B'nin ölçülen uzama yüzdesi, daha büyük ölçü uzunluğuna sahip Numune A'nın uzama yüzdesinden daha büyük olacaktır.

Denklem 1:

$$Yüzde\ Uzama = \frac{\Delta L}{Lo} * 100$$

L_0 orijinal ölçü uzunluğudur. ΔL orijinal ölçü uzunluğunun uzunluğundaki değişikliktir. Numune kırıkları ve numune birbirine yerleştirildikten sonra ölçülür (Şekil 12) Sonuç olarak ölçü uzunluğu arttıkça uzama yüzdesi azalır. [1,7,6]

C.2 Farklı Kesit Alanlarının Çekme Testine Etkisi

Bu sefer, aynı malzemeden yapılmış olan Numune A ve Numune B aynı ölçü uzunluklarına sahiptir; ancak Numune A'nın kesit alanı, Numune B'nin kesit alanından daha büyüktür. Ölçü uzunluğu ve boyun vermenin kapladığı kısım konseptine benzer şekilde, boyunlandırma bölgesi daha küçük çaprazın çok daha büyük bir bölümünü kaplayacaktır. - Numune A'nın daha büyük kesit alanında kaplanan kısımla karşılaştırıldığında Numune B'nin kesit alanı. Bir numunenin kesit alanının uzama ölçümleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. İncelik oranı ölçü uzunluğunun kesit alanının karekökünе bölünmesiyle ölçülür, dolayısıyla kesit alanıyla ters orantılıdır.

Denklem 2:

$$\text{İncelik Oranı} = \frac{\text{Lo}}{\sqrt{\text{A0}}}$$

L_0 orijinal ölçü uzunluğudur. A_0 numunenin orijinal kesit alanıdır. Numune kırıkları ve numune birbirine yerleştirildikten sonra ölçülür (Şekil 12) Sonuç olarak incelik oranı arttıkça ve kesit alanı azaldıkça uzama yüzdesi azalır. [1,7,6]

D. Malzeme ve Numune Döküm Süreci

Ergitilen alaşım gaz giderme işlemi sonrasında şekil 14'te görülen kalıpta, çubuk malzeme dökümleri Şekil 15'te görüldüğü gibi elle yapılmıştır. Soğuma sonrası elde edilen Şekil 16'teki çubuklar, ısıl işlem ve doğal boya fırınlarından geçirilmiş ve en son A 5x25 ve A 6x30 boyutlarında işlenmiştir (Şekil 17). Çekme testleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında;

1. Çubuk numuneden hazırlanan A5x25mm boyutlarındaki çekme testi
2. Çubuk numuneden hazırlanan A6x30mm boyutlarındaki çekme testi
3. Janttan hazırlanan A5x25mm boyutlarındaki çekme testi
4. Janttan hazırlanan A6x30mm boyutlarındaki çekme testi

Gerçek ortamda yapılmış ve aynı koşullarda MİNİTAB yazılımında sanal ortam simülasyonları yapılmıştır. Tüm koşullardaki sonuçlar değerlendirilerek gerçek ortam ve simülasyon ortamının kıyaslanmasına olanak sağlanmış olup en uygun çekme çubuk boyutu müşteri beklentileri doğrultusunda tespit edilmiştir.



Şekil. 13 Alüminyum sıvı metal gaz giderme işlemi



Şekil 14. Alüminyum çubuk döküm kalıbı



Şekil 15. Alüminyum çubuk döküm işlemi



Şekil 16. Kalıptan çıkan çubuklar



Şekil 17. A 5x25 ve A 6x30 Çekme Çubukları



Şekil 18. Döküm Jant Numuneleri ve Test Numunesi Alınan Bölgeleri

E. Çekme Test ve Sonuçların Analiz Süreci

Bu çalışmada AlSi7Mg0,3 ısıl işlemli alüminyum döküm alaşımı kullanılmış olup aynı döküm ve ısıl işlem şartlarındaki döküm partisi numuneleri kullanılıp çekme testi yapılmıştır. Do=6mm numunelerin Rm, Rp0,2, %e değişimi, Do=5mm numunelerin Rm, Rp0,2, % e değişimi, Lo=25mm numunelerin Rm, Rp0,2 ,%e değişimi, Lo=30mm numunelerin Rm, Rp0,2, %e değişimi, çekme test sonuçları, Minitab yazılımı kullanılarak ANOVA hipotez test yapılarak istatistiksel analiz edilip anlamlılığı doğrulanmış, normal dağılım gösterdiği görülmüş ve yorumlanmıştır.

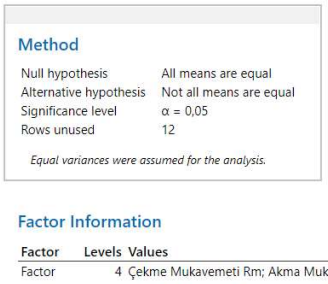
III. SONUÇLAR

Tablo 2. Çekme Çubuk Kalıbı Çekme Testi Verileri

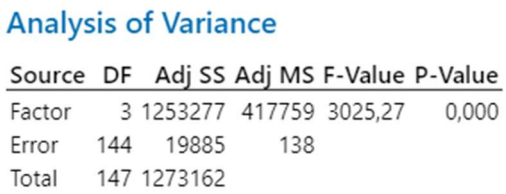
Çekme Mukavemeti Rm	Akma Mukavemeti Rp0,2	% Uzama	Numune Boyut	Numune Şarj	% Total Uzama
198,268	168,964	1,53	FORM A6	CN1-1	2,24
225,848	171,084	4,72	FORM A6	CN1-2	5,25
215,048	173,17	2,77	FORM A6	CN1-3	3,4
184,333	163,49	1,15	FORM A6	CN1-4	1,96
208,253	170,792	2,49	FORM A6	CN1-5	3,22
217,913	169,007	3,48	FORM A6	CN2-1	4,12
206,513	171,971	1,93	FORM A6	CN2-2	2,66
223,416	173,17	3,28	FORM A6	CN2-3	3,97
154,213			FORM A6	CN2-4	0,92
212,766	171,716	2,71	FORM A6	CN2-5	3,4
173,55	160,834	0,77	FORM A6	CN3-1	1,76
191,548	167,932	1,12	FORM A6	CN3-2	1,88
193,067	165,401	1,78	FORM A6	CN3-3	2,42
			FORM A6	CN3-4	1,14
188,27	163,576	1,43	FORM A6	CN3-5	2,24
190,569	162,013	1,92	FORM A6	CN4-1	2,74
216,679	169,067	3,76	FORM A6	CN4-2	4,45
216,277	165,169	4,96	FORM A6	CN4-3	5,7
221,367	168,512	4,42	FORM A6	CN4-4	5,19
185,126	161,886	1,71	FORM A6	CN4-5	2,63
230,947	172,819	6,08	FORM A5	CN1-1	6,89
235,572	174,923	5,86	FORM A5	CN1-2	6,59
224,829	171,389	5,8	FORM A5	CN1-3	6,58
229,599	170,469	5,93	FORM A5	CN1-4	6,68
188,141	165,134	1,5	FORM A5	CN1-5	2,29
215,526	169,585	3,45	FORM A5	CN2-1	4,25
189,039	164,813	1,32	FORM A5	CN2-2	2,18
247,18	173,525	9,02	FORM A5	CN2-3	9,74
210,513	167,752	3,49	FORM A5	CN2-4	4,26
188,755	166,354	1,66	FORM A5	CN2-5	2,5
231,682	171,034	7,64	FORM A5	CN3-1	8,47
146,923			FORM A5	CN3-2	1,17
196,431	164,464	2,26	FORM A5	CN3-3	3,08
188,033	163,38	1,7	FORM A5	CN3-4	2,53
183,654	161,483	1,52	FORM A5	CN3-5	2,46
191,262	162,528	2,1	FORM A5	CN4-1	2,98
161,282			FORM A5	CN4-2	1,38
			FORM A5	CN4-3	0,93
209,027	165,204	3,98	FORM A5	CN4-4	4,78
207,688	166,096	3,45	FORM A5	CN4-5	4,22

E.1 Çekme Çubuk Kalıbı Çekme Testi – ANOVA HİPOTEZ TEST VE REGRESYON ANALİZİ

Minitab analizine ait görseller ve açıklamalar aşağıda verilmiştir.

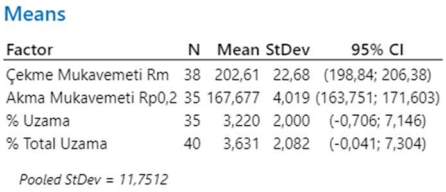


Şekil 19. 1 yollu ANOVA HİPOTEZ testi

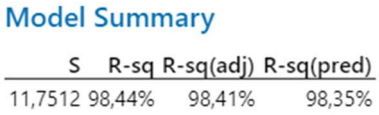


Şekil 20. ANOVA HİPOTEZ testi

Hipotez testi, bir hipotezin doğruluğunun istatistiksel bir güvenilirlik aralığında saptanması için kullanılan yöntemdir. Şekil 20'de görüldüğü üzere hipotez testi için p değeri < 0,05 olup verileri istatistiki olarak anlamlı olduğu yorumlanmıştır. Şekil 21'de görüldüğü üzere çekme, akma mukavemetleri, %uzama değerleri standart sapmaları hesaplanmıştır.

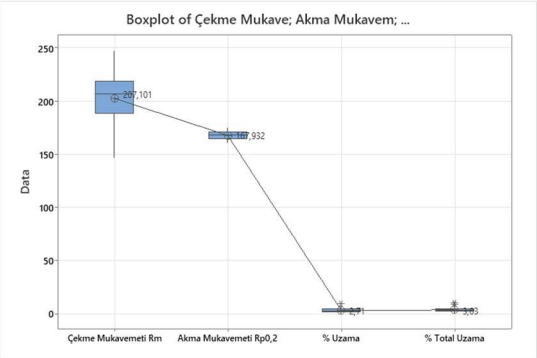


Şekil 21. Çekme, akma, %uzama ve % total uzama değerleri standart sapmaları

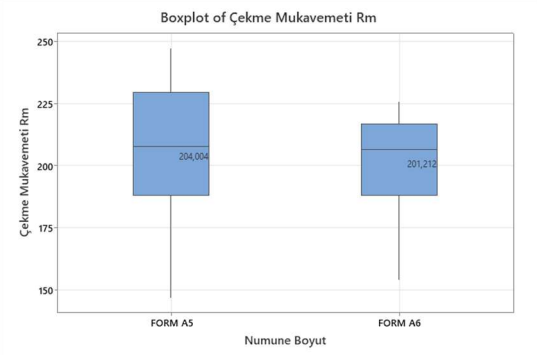


Şekil 22. Regresyon analiz sonucu

Şekil 22'de görüldüğü üzere çekme, akma mukavemetleri, % uzama değerleri 'nin regresyon analizi R-sq %98 değerleri bizlere birbirleri arasında güçlü ilişki olduğunu göstermiştir. %80 'in üzere regresyon analizi yorumlarında güçlü ilişki olarak yorumlanır. Şekil 23'te kutu grafiğinde görüleceği üzere çekme mukavemeti ortalaması 207 Mpa , akma mukavemetleri ortalaması ortalaması 167,0 Mpa, %uzama değeri %2,71, %toplam uzama değeri %3,03 sonuçlarına ulaşılmıştır. Özellikle uzama değerleri kutu ince olması nedeniyle daha kararlı çıkmış

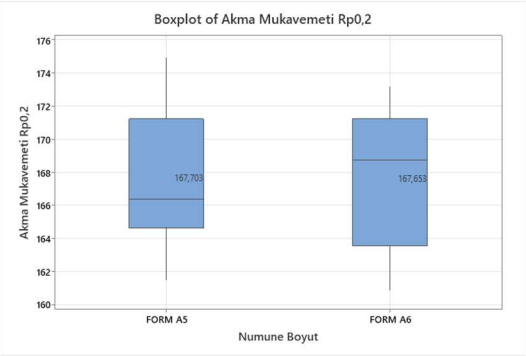


Şekil 23. Çekme, akma mukavemetleri , %uzama ve % total uzama değerleri kutu grafiği

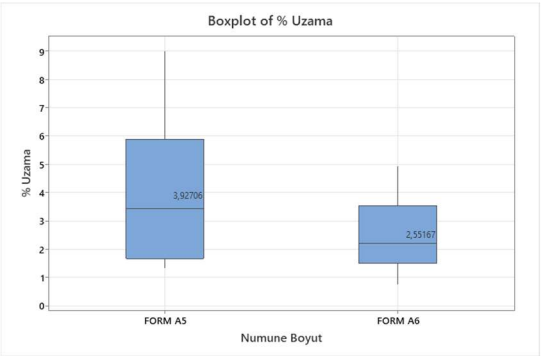


Şekil 24. FORM A5X25 ve FORM A6X30 Numune Boyutları Çekme Mukavemetleri Ortalamaları ve Kutu Grafiği

Şekil 24'de FORM A5X25 ve FORM A6X30 Numune Boyutları Çekme Mukavemetleri Ortalamaları ve Kutu Grafiği verilmiş olup FORM A5X25 çekme mukavemeti ortalaması 204 Mpa , FORM A6X30 çekme mukavemeti ortalaması 201 Mpa ulaşılmıştır. Form A5X25 numunelerin çekme mukavemetleri daha yüksek çıkmıştır. Şekil 25'de Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Akma Mukavemetleri Ortalamaları ve Kutu Grafiği verilmiş olup Form A5X25 akma mukavemeti ortalaması 167,7 Mpa , Form A6X30 akma mukavemeti ortalaması 167,6 Mpa ulaşılmıştır. Numune boyutlarının akma mukavemetine bariz etki etmediği sonucu çıkarılmıştır.



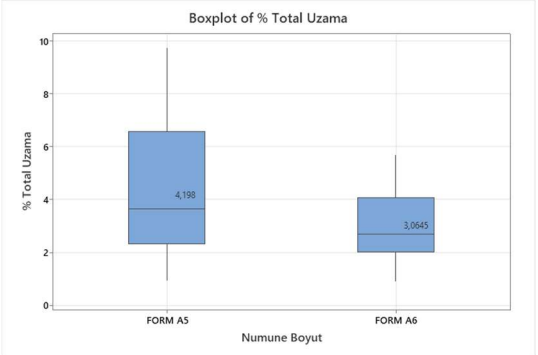
Şekil 25. FORM A5X25 ve FORM A6X30 Numune Boyutları Akma Mukavemetleri Ortalamaları ve Kutu Grafiği



Şekil 26. FORM A5X25 ve FORM A6X30 Numune Boyutları %Uzama Ortalamaları ve Kutu Grafiği

Şekil 26'da Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları %uzama (plastik uzama) ortalamaları ve Kutu Grafiği verilmiş olup Form A5X25 %uzama (plastik uzama) ortalaması % 3,92 , Form A6X30 %uzama ortalaması %2,55 olarak test edilmiştir. Form A5X25 Do=5mm ve Lo=25mm numunelerin %uzama değerleri, Form A6x30 Do=6mm Lo=30mm numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.

Şekil 27'de Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları % toplam uzama (elastik ve plastik uzama) ortalamaları ve Kutu Grafiği verilmiş olup Form A5X25 % toplam uzama (elastik ve plastik uzama) ortalaması %4,19 , Form A6X30 % toplam uzama (elastik ve plastik uzama) ortalaması %3,06 olarak test edilmiştir. Form A5X25 Do=5mm ve Lo=25mm numunelerin %toplam uzama değerleri, Form A6x30 Do=6mm Lo=30mm numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. [1,7]



Şekil 27. FORM A5X25 ve FORM A6X30 Numune Boyutları %Toplam Uzama Ortalamaları ve Kutu Grafiği

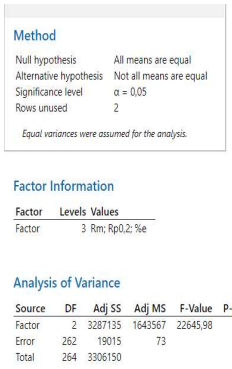
Tablo 3. Döküm Parça Çekme Testi Verileri

Rm	Rp0,2	%e	Bölge	Numune Boyut	Durum	Parça No
279,741	207,075	11,92	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
279,346	211,205	10,69	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
284,85	211,831	11,8	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
281,091	206,773	14,73	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
255,195	201,983	5,54	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
255,029	195,354	6,29	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
256,983	195,492	6,96	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
268,199	207,847	6,23	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
259,409	196,483	7,26	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	12
272,65	200,935	12,02	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
269,94	202,053	8,83	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
276,631	205,4	10,55	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
249,675	211,596	2,2	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
274,867	204,101	12,51	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
250,513	198,111	4,89	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
256,599	199,081	5,81	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
249,163	198,656	4,26	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
257,111	197,85	6,67	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
257,901	198,587	6,3	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	19
273,798	204,981	11,44	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
271,967	203,978	11,06	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
274,053	205,78	9,51	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
275,307	206,07	8,61	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
270,547	202,552	8,84	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
252,2	198,055	5,87	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
244,182	194,727	4,25	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
245,448	195,467	4,43	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
242,451	192,037	4,57	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
251,545			KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	14
274,627	204,847	11,55	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
278,329	208,621	10,35	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
279,885	213,819	9,71	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
279,173	209,352	11,63	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
282,108	211,232	12,59	DISRIM	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
246,831	195,201	5,07	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
258,873	196,45	6,81	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
257,182	202,922	5,78	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
256,807	195,061	8,02	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18
259,33	200,309	6,34	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	18

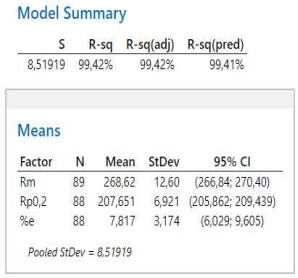
Rm	Rp0,2	%e	Bölge	Numune Boyut	Durum	Parça No
259,33	200,309	6,34	KANAT	A 5X25	1 TOZ FIRINLI	16
282,581	213,126	11,1	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
281,63	211,329	12,93	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
289,112	216,766	12,02	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
285,111	214,239	11,39	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
276,58	209,538	6,81	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
259,604	206,214	4,14	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
258,284	205,329	4,82	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
265,51	209,675	4,91	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
268,043	209,785	7,13	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
260,867	204,57	5,15	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	16
283,96	216,181	9,75	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
283,826	216,663	9,51	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
286,356	219,814	8,24	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
283,577	218,981	7,65	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
270,514	210,041	5,73	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
258,71	205,299	4,79	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
262,045	197,31	5,64	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
258,186	208,757	3,75	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
253,566	210,729	2,91	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
245,917	206,069	2,36	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	13
284,156	216,655	9,52	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
286,048	215,676	11,49	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
287,338	217,932	12,02	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
289,8	220,888	11,93	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
283,66	214,15	11,56	DISRIM	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
266,68	212,93	4,96	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
257,76	213,4	3,08	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
268,52	216,12	4,45	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
261,47	211,52	3,54	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
254,27	206,7	3,31	KANAT	A 6X30	2 TOZ FIRINLI	17
275,357	211,509	9,73	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
280,26	214,091	10,01	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
277,27	215,094	8,01	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
282,511	216,727	10,68	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
280,214	214,247	11,16	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
266,685	209,41	6,47	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
254,777	205,267	3,81	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
268,012	210,2	5,83	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
264,405	203,981	6,63	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
258,526	207,227	4,1	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	10
278,277	208,194	11,56	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
279,833	211,835	11,78	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
284,38	218,291	9,7	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
283,207	212,42	11,41	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
282,221	211,861	12,44	DISRIM	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
263,698	209,579	4,38	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
267,467	210,927	5,54	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
262,742	213,054	3,49	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
263,852	209,23	5,28	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20
270,502	209,849	7,8	KANAT	A 6X30	1 TOZ FIRINLI	20

E.2 Döküm Parça Çekme Testi – ANOVA HİPOTEZ TEST VE REGRESYON ANALİZİ

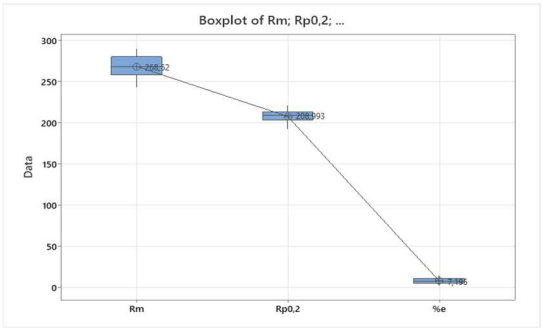
Minitab analizine ait görseller ve açıklamalar aşağıda verilmiştir.
Şekil 28'de görüldüğü üzere p değeri < 0,05 olup verileri istatistiki olarak anlamlı olduğu yorumlanmıştır.



Şekil 28. 1 yollu ANOVA



Şekil 29. Regresyon analiz



Şekil 30. Çekme, akma mukavemetleri, %uzama değerleri kutu grafiği sonucu

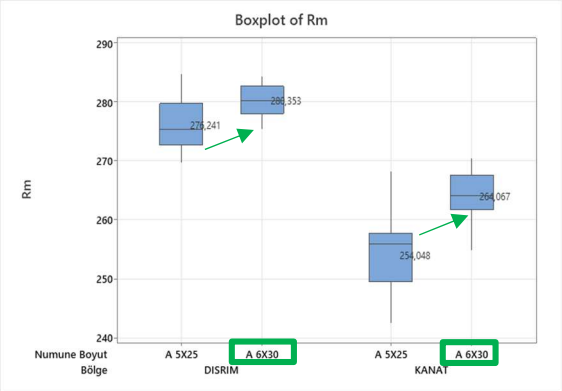
Şekil 29'da görüldüğü üzere çekme, akma mukavemetleri, %uzama değerleri 'nin regresyon analizi R-sq %99 değerleri bizlere birbirleri arasında güçlü ilişki olduğunu göstermiştir. %80 'in üzere regresyon analizi yorumlarında güçlü ilişki olarak yorumlanır.

Şekil 30'da kutu grafiğinde görüleceği üzere çekme mukavemeti ortalaması 268,5 Mpa , akma mukavemetleri ortalaması ortalaması 208,9 Mpa, %uzama değeri %7,19 sonuçlarına ulaşılmıştır. Döküm ve soğutma performansı etkisi ile değer kutuları ince görülmekte olup daha kararlı çıkmıştır.

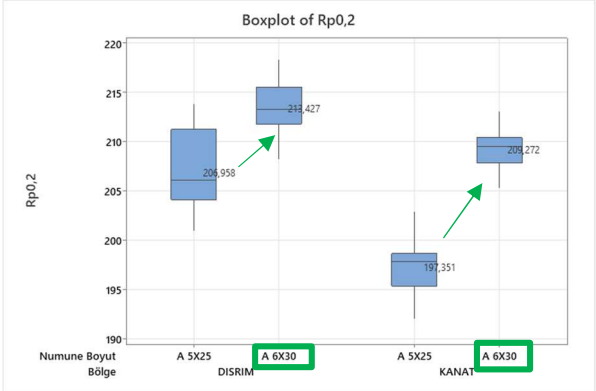
F. Döküm Parça Çekme Test Sonuçları Karşılaştırma

Döküm parçalar için jantın dış rim ve kanat bölgelerinden alınan her iki numune boyutlarından numunelere ait testler yapılmıştır.

Şekil 31'de görüleceği üzere çekme mukavemetleri (Rm) , hem dış rim hem kanat bölgeleri için Form6x30 numunelerde daha yüksek çıkmıştır. [1,7]



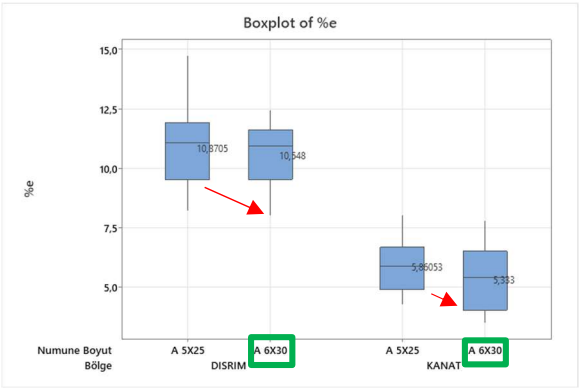
Şekil 31. Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Döküm Parça Bölgelerine göre Çekme Mukavemetleri Değerleri ve Kutu Grafiği



Şekil 32. Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Döküm Parça Bölgelerine göre Akma Mukavemetleri Değerleri ve Kutu Grafiği

Şekil 32'de görüleceği üzere akma mukavemetleri ($Rp_{0,2}$), hem dış rim hem kanat bölgeleri için yine Form6x30 numunelerde daha yüksek çıkmıştır. [1,7]

Şekil 33'de görüleceği üzere %uzama (%e), hem dış rim hem kanat bölgeleri için Form5x25 numunelerde daha yüksek çıkmıştır. [1,7,2]



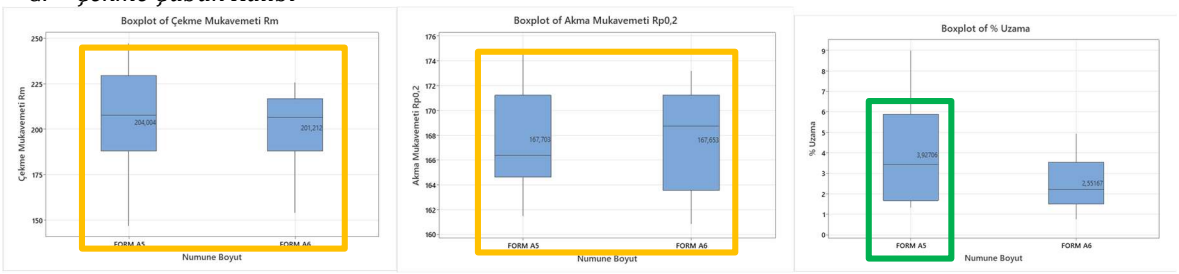
Şekil 33. Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Döküm Parça Bölgelerine göre %Uzama e Değerleri ve Kutu Grafiği

IV. TARTIŞMA

Çekme Çubuk kalıbı ve döküm parçalardan yapılan farklı numune boyutlarındaki çekme testleri sonucunda çekme akma ve %uzama değerlerinin farklılıklarının ciddi sebebi döküm şekli, süresi,soğutma özellikleridir. Bu çalışmada hem çekme çubuk kalıbı hem de döküm parçada farklı numune boyutlarının sonuçlara nasıl etki ettiği, literatürle uyumluluk olup olmadığı araştırılması ve bunun Döktaş Dökümcülük Jant tesisinde nasıl katma değer yaratabileceği araştırılmış, analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

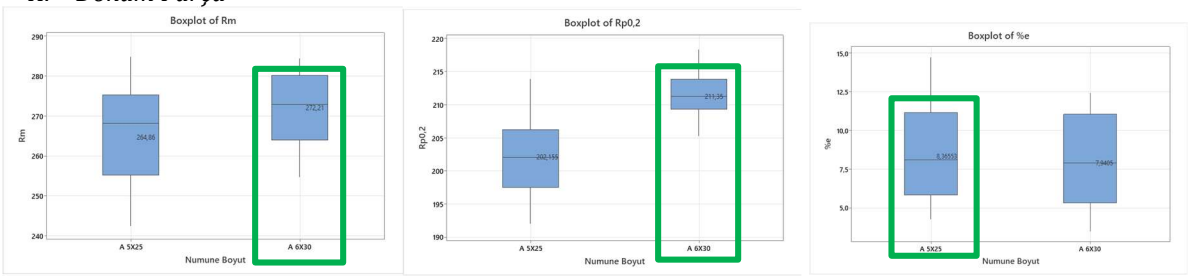
Hipotez testi ve ANOVA testleri ile veriler istatistiki olarak analiz edilmiş ve literatüre uygun olup olmadığı çekme çubuk kalıbı ve döküm parça verileri karşılaştırılmıştır. Çekme kalıbı grafiklerine göre, çekme ve akma mukavemetleri Form A5X25 ve Form A6X30 numunelerde birbirine çok yakın bulunmuş olup (Şekil 31, turuncu işaretli) %uzama değeri Form A5X25 numunelerde yüksek (Şekil 31, yeşil işaretli) çıkmıştır. Döküm parça grafiklerine göre, çekme ve akma mukavemetleri Form A6X30 numunelerde yüksek çıkmış olup (Şekil 32, yeşil işaretli) %uzama değerleri de Form A5X25 numunelerde yüksek (Şekil 32, yeşil işaretli) çıkmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda döküm parçaların verileri literatürle tutarlı çıkmıştır. [7,8,9,3]

G. *Çekme Çubuk Kalıbı*



Şekil 34. Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Çekme Kalıbı Çekme Akma Mukavemetleri ve %Uzama e Değerleri ve Kutu Grafikleri

H. *Döküm Parça*



Şekil 35. Form A5X25 ve Form A6X30 Numune Boyutları Döküm Parça Çekme Akma Mukavemetleri ve %Uzama e Değerleri ve Kutu Grafikleri

V. ÇIKARIM

Sonuç olarak Form A 5x25 ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemetlerine daha düşük, akma mukavemetlerine etki etmediği (Ancak malzeme ve döküm parametre etkileri ile döküm parçasında akma mukavemeti daha düşük olduğu tespit edildi.) ve Form A 6x30'a göre % uzama değerleri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çekme kalıbı veya döküm parça çekme ve akma mukavemetlerine malzeme, döküm parametreleri ve numune bölgesi de etki ettiği görülmüştür. Bu sayede elde edilen verilerin ve sonuçların güvenilirliği ve verimliliği arttırılmıştır. Malzemenin döküm parçalar için bölgesel bazlı incelemesinde döküm, ısıl işlem ve boya yaşlandırma etkisi ile çekme, akma mukavemetleri ve % uzama e yüksek veya düşük olduğu bilinmektedir. Özellikle iç rim , dış rim bölgeleri, göbek bölgesinde Form A 5x25 numunelerinin kullanılması dizayn olarak ince ve dar bölgelerden daha homojen numune çıkarılması ve işlenmesine katkı sağlayacaktır. Jant sektörlerinde kanat bölgesi problemli ve müşteriler tarafından geliştirilmesi beklenen bölge olup kanat bölgesi uzun yıllardır numune boyutu büyüklüğü sebebiyle daha düşük %uzama değerleri alındığı tespit edilmiştir. Yeni ve beklenti yüksek olan projelerde müşterilerimizde de olduğu gibi [4,5] Form A 5x25 numune boyutlarının kullanımı sonuçların müşteri-tedarikçi ilişkisinde aynı şartlarda yorumlanmasını da katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımıza imkân veren başta Döktaş Dökümcülük A.Ş. 'ye, özverili çalışma ve takibi için tüm Jant Kalite Laboratuvar ekibime ve detaylı araştırmalarımızda bizlere katkı sunan Jant İş Birim Direktörümüz Sn. Doğan Alpdoruk'a teşekkür ederim. Değerli olumlu olumsuz geri bildirimlerini yapacak değerli okurlarımıza teşekkür eder, keyifli okumalar dilerim.

KAYNAKLAR

[1] Deniz Yalçın, How do different speciment geometries affect on tensile test results, July 2017
[2] https://www.admet.com/blog/effect-specimen-geometry-tensile-testing-results/#:~:text=The%20short%20answer%20is%20that,yield%20strength%20of%20standard%20materials.
[3] ISO Standard 6892-1:2016 2016 Metallic materials- Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature
[4] PSA müşteri şartnamesi B 54 2110- 2018
[5] VW – TL 055 – 2018
[6] Admet Materials Testing Guide, July 2013
[7] ASTM E8/E8M-11 2013 Standard test methods for tension testing of metallic materials
[8] M.S.Masete , N.S.Muchaviand ,S.Chikosha, The effect of specimen geometry on tensile properties of titanium alloy metal sheet, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 430,October 2018
[9] DIN Standard 50125:2009-07, Testing of metallic materials – Tensile Test Pieces

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Farklı Evrişimli Sinir Ağı Mimarilerinin İkili Görüntüler Üzerindeki Sınıflandırma Performansının İncelenmesi

Yasin ÖZKAN[a], Pakize ERDOĞMUŞ[b]*

[a]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Karadeniz Ereğli Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Zonguldak/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** yasin.ozkan@beun.edu.tr*

ÖZET

Büyük verinin hızlı işlenmesinin büyük önem taşıdığı günümüz dünyasında, büyük veriden öznitelikleri otomatik olarak çıkararak birçok problemin çözümünde büyük kolaylık sağlayan derin öğrenme algoritmalarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Evrişimsel Sinir Ağları (ESA), özellikle sınıflandırma amaçları açısından en yaygın kullanılan ağ yapılarından biridir. Bu çalışmada ikili görüntüleri kategorize etmek için ESA kullanıldı. Bu amaçla ikili görüntülerden oluşan iki farklı veri seti kullanılmıştır. 216-İkili Şekil veri setlerinde 17 sınıf bulunmaktadır. 216-Binary Shape veri seti ile AlexNet, VGG-16, DarkNet-19 derin öğrenme modelleri ve oluşturduğumuz derin öğrenme modeli üzerinde farklı parametre değerlerini test ederek en iyi sonucu elde etmeye çalıştık. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen en iyi hiper parametrelerle eğitilen ağlar test edilmiş ve ağ modellerinin doğruluk oranları karşılaştırılmıştır. İlk veri setinde modellerin performansı ve parametrelerin etkileri incelenmiştir. 1070-İkili Şekil veri setinde 40 sınıf bulunmaktadır. İkinci veri seti yalnızca oluşturulan derin öğrenme modelinde çalıştırıldı. Burada amaç oluşturulan ağ üzerinde farklı sınıf numaralarını deneyerek en başarılı sonucu elde etmektir. Bu makalenin ilk bölümünde Evrişimli sinir ağı modelleri ve oluşturduğumuz modelin sonuçları karşılaştırılmaktadır. AlexNet ağının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlendi. İkinci bölümde sınıf sayısının oluşturduğumuz derin öğrenme modeline etkisi sonuçlarıyla birlikte incelenmiştir. Sınıf sayısıyla oluşturulan derin ağ modelinin başarı oranının ters orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Evrişimli Sinirsel Ağlar, İkili Görüntü, Sınıflandırma

Investigation of Classification Performance of Different Convolutional Neural Network Architectures on Binary Images

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

In today's world, the rapid processing of big data is of great importance, the use of deep learning algorithms, which provide great convenience in solving many problems by automatically extracting attributes from big data, is increasing day by day. Convolutional Neural Networks (CNN) are one of the most widely used network structures, especially for the classification of the purposes. In this study, CNN was used to categorize binary images. For this purpose, two different datasets consisting of binary images were used. 216-Binary Shape datasets have 17 classes. With the 216-Binary Shape dataset, we tried to achieve the best result by testing different parameter values on the deep learning models AlexNet, VGG-16, DarkNet-19 and the deep learning model we created. Networks trained with the best hyper parameters obtained as a result of these studies were tested and the accuracy rates of network models were compared. In the first dataset, the performance of the models and the effects of the parameters were examined. There are 40 classes in the 1070-Binary Shape dataset. The second dataset was only run on the deep learning model generated. The aim here is to obtain the most successful result by trying different class numbers on the network created. In the first part of this article, the convolutional neural network models and the results of the model we have created are compared. It has been observed that the AlexNet network established better results. In the second part, the effects of the number of classes on the deep learning model we have created are

examined together with its results. It is seen that the success rate of the deep network model created with the number of classes increases inversely.

Keywords: *Convolutional Neural Networks, Binary Image, Classification*

I. GİRİŞ

Son zamanlarda makine öğrenimi hayatımızın hemen hemen her alanında bulunmaktadır. Makine öğrenmesi; veriler üzerinde yapılan işlemlerden çıkarımlarda bulunarak tahminler yapan sistemlerin bilgisayarlarla modellenmesidir. Bu model, mevcut veri seti ve kullanılan algoritmayla oluşturulur. Makine öğrenmesi modellerinin asıl hedefi maksimum performans elde etmektir[1]. Makine öğrenme tekniğinin en fazla kullandığı mimari derin öğrenme modelidir. Derin öğrenme, insan beyninin işlevlerini taklit eden hesaplama sistemlerine dayanmaktadır [2]. Derin öğrenme ağları; denetimsiz, denetimli ve pekiştirmeli öğrenme gibi çeşitli sorunların çözümü için kullanılmakta ve son zamanlarda bu alanda araştırma yapan kişilerin ilgisini çekmiştir. Derin öğrenme ağları kullanılarak tıbbi teşhis, görüntü işleme, doğal dil işleme ve metin analizi gibi alanlarda başarılı sonuçlar alınmakla birlikte sadeece bu alanlarla da sınırlı değildir[3]. Derin öğrenme ağları çok boyutlu girdilerden özellikleri otomatik olarak çıkarma, karmaşık ve büyük veri kümelerinde doğru tahmine dayalı yeteneklere sahiptir. Derin öğrenme ağlarının bu özellikleri içermesi sebebiyle en yaygın olarak kullanılan türü Evrişimli Sinir Ağlardır[4].

Görüntü sınıflandırma, görüntünün girdi olarak alınmasının ardından bir sınıfın ya da görüntü için onu en iyi tanımlayan sınıfların olasılıklarının çıkartılması işlevi anlamına gelmektedir. Bu durum canlılarda özellikle de insanlar için, doğumdan itibaren başlayıp öğrenilen ilk becerilerindendir. Bilgisayarlar ise görüntüyü girdi olarak alır ve görüntünün çözünürlüğüne, boyutuna bağlı olarak genellikle 8 birlik bir dizi piksel değerleri görür. Bu piksel değerleri 0'dan 255'e kadar o noktadaki piksel yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu değerler, görüntü sınıflandırmasında bilgisayar için girdilerdir. Bilgisayarın bu sayı dizisini alıp görüntünün belli bir sınıf, örneğin kamyon için 0.40, motorsiklet için 0.20, yelken için 0.80 olması olabilirliğini ifade eden olasılıklar bilgisayarın çıktılarıdır. Olasılıkla belirtilen bu sayılar bir anlam ifade etmektedir. Artık buradaki amaç tüm görüntüleri ayırt edebilmek ve görüntülere ait eşsiz özellikleri bulmaktır. İnsan için bilinçaltında da faaliyet gösteren aşamalar aslında budur. Bir motorsikletin görüntüsüne bakıldığında iki teker gibi belirlenebilir özellikleri varsa, bu bir motorsiklet olarak sınıflandırılabilir. Aynı şekilde bilgisayar da kenar ve eğriler gibi alt düzeyde özellikleri arayıp daha sonra bir dizi evrişim katmanı yoluyla görüntü sınıflandırmasını gerçekleştirebilmektedir. Bu ESA'lar da görüntü sınıflandırma işlemlerinin genel olarak işleyişini tanımlamaktadır.

Görüntüdeki tüm pikseller için 0 ya da 1 renk değerlerinden oluşan görüntüler ikili görüntülerdir. Sembolik olarak 1 renk değeri beyazı, 0 renk değeri de siyahı göstermektedir. Elde edilen görüntü yalnızca siyah ve beyaz renkten oluşur. Bu nedenle ikili görüntü olarak da adlandırılır. İkili görüntü, bölütleme algoritmaları için çok yararlı olmasına rağmen, diğer görüntü türlerine kıyasla piksellere ilişkin özellik azdır [5]. RGB renk uzayını kullanan renkli görüntüler ise üç renk katmanından oluşmakta ve bu görüntülerde renk bilgileri bulunmaktadır. ESA modellerinin renkli görüntüler üzerindeki sınıflandırma başarımları da bu sebeple daha yüksektir. Ayrıca renkli görüntülerden oluşan veri setleri bulmak kolay ve bu veri setleri ile ilgili ESA sınıflandırma çalışmalarında başarımlar yüksektir. İkili görüntülerin kullanım alanlarıda (döküman analizi, endüstri, medikal görüntüleme, qr code) günden güne artmaktadır. Fakat ikili görüntülerden oluşan veri seti bulmak ve oluşturmak zorlu bir iştir. Ayrıca ikili görüntüleri, renkli görüntülerle karşılaştırıldığında ikili görüntülerde renk bilgisinin olmaması sebebiyle genellikle ESA başarımları daha düşüktür.

Literatüre bakıldığında görüntülerin sınıflandırılması ile bir çok çalışma görülürken, araştırma alanında ikili görüntülerin sınıflandırılmasına yönelik çalışmalar yetersizdir. Bu amaçla, alana iki farklı noktadan katkı sunabilecek bu çalışmayı öneriyoruz. İlk olarak, %97.06'a varan yüksek bir doğruluk elde eden ve kıyaslama modelleriyle rekabet edebilen yeni bir ikili görüntü tanıma ağ modeli önerildi. İkinci olarak, derin öğrenme araştırmacılarına ileride katkı sunması için deneyler ve bulguları sunuldu. Çalışmanın kalan bölümleri şu şekilde ilerlemektedir: 2. bölümde ilgili alanda yapılan çalışmalar kısaca sunulmuştur. 3. bölümde kullanılan veri setleri ve yöntem açıklanmıştır. 4. Bölümde yapılan deneylerin sonuçları ve tartışmaları sunulmaktadır. 5. bölümde ise bu çalışmadan sonra yapılabileceklerle ilgili bilgiler verilerek çalışma sonlandırılmıştır.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Derin öğrenme alanında meydana gelen önemli gelişmelerle birlikte görüntü sınıflandırma alanında çalışan araştırmacılarda alana daha fazla katkı sunma olanaklarına sahip oldular. İlk zamanlarda bu alan ile ilgili çalışmalara bakıldığında görüntülerin sınıflandırması için geleneksel makine öğrenimi algoritmalarının kullandıldığı görülmektedir. Sonrasında derin öğrenme ağlarındaki meydana gelen büyük ilerlemelerle birlikte ESA mimarileri ile önemli çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu noktada ESA mimarisinin, makine öğrenmesi algoritmalarına göre en büyük avantajı, verilen ham verilerden özellik çıkarma konusunda yetenekli olmalarıdır.

Shuo ve arkadaşları, ikili görüntüler ile ilgili bir teorem sunmak için ESA tabanlı LOGOR adında yeni bir algoritma önermiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında önerilen sistem ile bu alanda etkili sonuçlar elde edilmiştir[6]. Gao ve arkadaşları tarafından da ikili görüntülerde bulunan pikselleri döndürmek için ESA tabanlı bir rotasyon algoritması ortaya konulmuştur. Önerilen bu algoritmanın performansı Matlab'ın rotasyon algoritması ile karşılaştırıldı. Matlab'ın rotasyon algoritmasının ikili görüntüler üzerinde daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir [7][8].

Mujawar ve arkadaşları, el yazısıyla yazılmış ikili görüntülerden oluşan MNIST veri setini kullanarak yeni bir ESA mimarisi sunmuştur. Matlab üzerinde oluşturulan ESA mimarisinin performansı Deep Belief Network (DBN), Stacked Autoencoder (SAE) ve Neural Network (NN) algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan mimari, diğer üç algoritma ile karşılaştırıldığında % 96 doğruluk oranı ile iyi bir performans göstermiştir[9].

Kas zedelenmeleri, kırıklar herhangi bir canlı organizmanın karşılaştığı en yaygın yaralanmalardandır. Bu gibi yaralanmalar doktorlar tarafından da kolayca gözden kaçırılabilmektedir. Chittajallu ve arkadaşları tıp alanında yaşanılan bu soruna ESA mimarileriyle çözüm bulmaya çalışmıştır. Kırıklardan oluşan X-Ray(gri tonlamalı) görüntülerini tanımlamak için üç katmanlı bir ESA mimarisi tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlarda oluşturulan mimarinin doğru tahminler yaptığı görülmektedir[10]. Khandelwa ve arkadaşları medikal maske kullanımına ilişkin ikili görüntü sınıflandırma problemi için bir derin öğrenme modeli önermişlerdir. Çalışmalarında, MobileNet v2 modeli kullanarak 380'i maskeli ve 460'ı maskesiz olmak üzere görüntü kümesi kullanmışlardır [11].

Yang ve arkadaşları, Animal, MPEG-7,Swedish leaf ve ETH-80 veri setleri ile şekil sınıflandırma yapılarak sonuçları alınmıştır. Animal veri setinde %88,85, MPEG-7 veri setinde %96,27, Swedish leaf veri setinde %98,31 ve ETH-80 veri setinde %97,93 olarak elde edilmiş ve önceden geliştirilen yöntemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek sonuçlar alınmıştır[12]. Patel ve arkadaşları bir şeklin parça analizini yapmak ve ilgili şekle özgü veri artırmak için yeni bir teknik önerdiler. Çalışmaları içerisinde Animal ve MPEG-7 adlı ikili görüntülerden oluşan iki farklı veri seti kullandılar. Sınıflandırma işlemi için iki adet hazır ESA modeli (vggnet,googlenet) kullanarak sonuçları karşılaştırılmıştır[13].

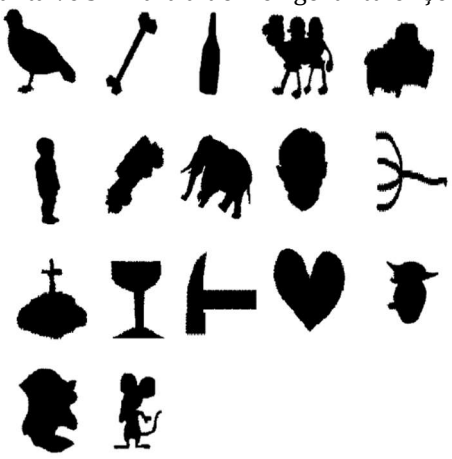
Dermoskopik görüntüler, her türlü cilt lezyonunun analizi için derinlemesine bilgi sağlamaktadır. Jayalakshmi ve arkadaşları, deri lezyonu tipinin iyi huylu veya kötü huylu olup olmadığını belirlemek için dermoskopik görüntülerin sınıflandırılması üzerine çalışmalar yaptılar. Lezyon tanımlanması ve görüntülerin sınıflandırılması için Batch Normalization ESA mimarisi önerilmektedir. Önerilen modelin deneysel sonuçlarına bakıldığında % 89,30 oranında daha iyi doğruluk sağladığı görülmektedir[14]. Görüntüler üzerinden bazı özelliklerin çıkarılması zordur. Derin öğrenme tekniği kullanılarak görüntülerden özelliklerin çıkarılması sağlanabilmektedir. Ramanjaneyulu ve arkadaşları görüntülerde bulunan özellikleri çıkarmak için derin öğrenme mimarisinde bulunan VGG-16 modelini kullandı. Bu mimari kullanılarak veri tabanlarında bulunan görüntülerin özellikleri çıkarılmış ve başarılı sonuçların elde edildiği görülmüştür[15].Wang ve arkadaşları, trafik sıkışıklıklarını tespit etme ve sıkışıklıkların artmasını önlemek için bir sistem tasarlanmıştır. İlk olarak derin öğrenme olmadan özellik çıkarımına dayalı geleneksel yöntem ile 30000'den fazla görüntü içeren veri tabanı üzerinde denemeler yapılmıştır. Daha sonrasında AlexNet ve VGGNet mimarilerine dayanan ESA tabanlı TrafficNet adını verdikleri bir mimari oluşturarak bu mimari üzerinde 30000'den fazla görüntü eğitilerek test edilmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında önerilen yöntemin geleneksel yöntemden çok daha iyi ve % 90 oranında başarılı olduğu görülmektedir [16].

III. MATERYAL METOT

Bu bölümde, veri seti yapısı, sunulan ağ modeli ve önerilen modeli kıyaslamak için oluşturulan modeller aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

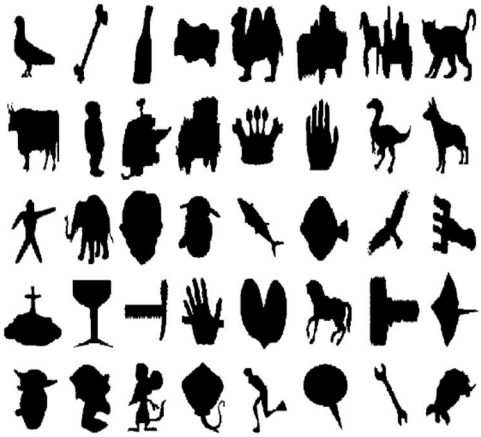
A. Kullanılan Veri Setleri

Çalışma kapsamında 2 farklı veri seti kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ilk veri seti 216 Shape; kemik, fil, çekiç, araba vb. 17 sınıftan oluşan bir dizi ikili görüntüden oluşmaktadır. 216 Shape veri kümesindeki her bir sınıf 12 görüntüden oluşmakta ve sınıflara ait örnek görüntüler Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. 216 Shape veri kümesindeki sınıf örnekleri

Çalışmada kullanılan ikinci veri set, 1070 Shape; el, anahtar, taç, kedi, köpek, balina vb. 40 sınıftan oluşan bir dizi ikili görüntüden oluşmaktadır. Her sınıf 12 görselden oluşmakta olup tüm görseller 160*160'a ölçeklendirilmiştir. 1070 Shape veri kümesindeki her bir sınıf 12 görüntüden oluşmakta ve sınıflara ait örnek görüntüler Şekil 2'de sunulmaktadır.



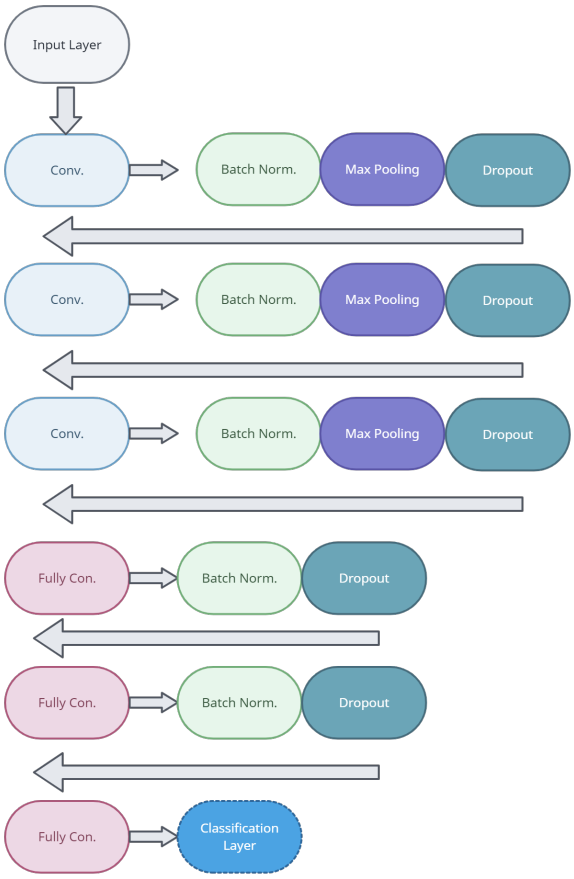
Şekil 2. Animal veri setinde bulunan sınıflardan örnekler

Ön işleme adımları önerilen ESA modellerinin performanslarını etkilemektedir[17]. Önerilen modelin performansını artırmak için veri setindeki her görüntü ön işleme tabi tutulmuştur. Çalışma içerisinde kullanılan veri setindeki tüm ikili görüntüler 160 piksel ×160 piksel şeklinde yeniden boyutlandırılmıştır.

B. Model Konfigürasyonu

İkili görüntüleri sınıflandırma görevi için ESA tabanlı özgün bir model önerilmiştir. Önerilen model, 20 katmandan meydana gelmektedir. Önerilen modelinin genel görünümü Şekil 3'te sunulmaktadır. Ayrıca önerilen modelde kullanılan katmanlar ve hiper parametreler de Tablo 1'de sunulmaktadır. Model, özellik çıkarmak ve evrişim işlemlerini gerçekleştirecek olan evrişim(Convulation) katmanıyla başlamaktadır. ReLU[18], doğrusal olmayan negatif girdiler için 0 değerini pozitif değerlerde de o değeri döndüren aktivasyon fonksiyonu olarak kullanıldı. Bu katmandan sonra sırasıyla yığın normalleştirme(Batch Normaliazation), maksimum havuzlama(Max pooling) ve bırakma(Dropout) katmanları kullanılmıştır. Katmanların bu şekilde kullanılmasının nedenleri: yığın normalleştirme, minibatch'de(eğitim veri işlem boyutu) bulunan örnekler üzerinden hesaplanan çıktıların ortalama ve standart sapması ile her bir aktivasyon çıktısını normalleştirmek için kullanılan tekniktir[19]. Önerilen modelde, evrişim ve tam bağlantılı katmanlardan sonra yığın normalleştirme katmanı kullanılmıştır. Maksimum havuzlama, sinirsel

ağı eğitmek için geçen süreyi azaltmaktdır. Ayrıca havuzlama penceresi üzerinde maksimum fonksiyonu uygulayarak görüntülerin girdi boyutlarını azaltan örnekleme tekniği olarak kullanılmaktadır[20]. Gelen görüntülerin boyutunun küçültülmesiyle birlikte, verilen örnekleri ait oldukları sınıflara göre sınıflandırma doğruluğu açısından modelin performansını da arttırmaktadır[21]. Bırakma karmanı, aşırı öğrenme sorununu önlemek için önerilen ve sıklıkla kullanılan bir tekniktir[22]. Aşırı öğrenme, ESA'ların en büyük zorluklarındandır. Bırakma katmanı, eğitim sırasında nöronları rastgele şekilde düşürür. Maksimum havuzlama katmanları da aşırı öğrenme olmasını engellemeye yardımcı olmaktadır. Bu katmanlardan sonra üç tam bağlantı katmanı kullanıldı. Son olarak, modele gelen görüntülerin sınıflandırılması için Softmax katmanı kullanılmıştır.



Şekil 3. Önerilen ESA modelinin görüntüsü

Tablo 1. Çalışmada sunulan ESA modelinin özellikleri

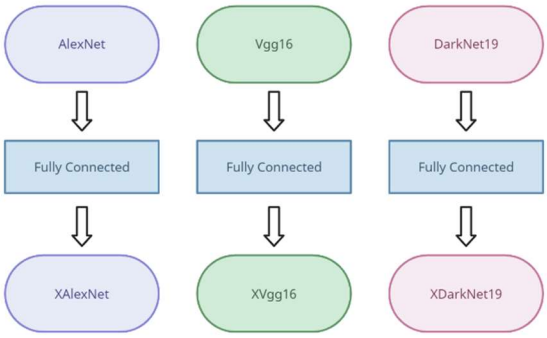
*	Katman	Hiper parametreler	*	Layer	Hiper parametreler
1	Conv	Filters:8 Activation: ReLU Filter size: (3x3)	11	Max P.	Pool size: (2x2) Stride: (2x2)
2	Batch N.	Epsilon: 0.0001	12	Dropout	Rate: 0.3
3	Max P.	Pool size: (2x2) Stride: (2x2)	13	FC	Units: 128 Activation: ReLU
4	Dropout	Rate: 0.3	14	Batch N.	Epsilon: 0.0001
5	Conv	Filters:16 Activation: ReLU Filter size: (13*13)	15	Dropout	Rate: 0.3
6	Batch N.	Epsilon: 0.0001	16	FC	Units: 64 Activation: ReLU
7	Max P.	Pool size: (2x2) Stride: (2x2)	17	Batch N.	Epsilon: 0.0001
8	Dropout	Rate: 0.3	18	Dropout	Rate: 0.3
9	Conv	Filters:32 Activation: ReLU	19	FC	Units: 17 Activation: Softmax

		Filter size: (3x3)			
10	Batch N.	Epsilon: 0.0001	20	Class.	-

Önerilen model eğitiminde, Aşırı öğrenme olmaması için EarlyStopping kullanılmıştır. EarlyStopping hem overfittingi önlemekte hem de optimum bir zamanda eğitimi durdurmak için kullanılmaktadır [23]. Önerilen modeli ve bir sonraki bölümde tanıtılacak kıyaslama modelleri, "216 Shape" olarak adlandırılan veri seti üzerinde eğitilmiştir. Ayrıca önerilen model ve diğer kıyaslama modelleri "1070 Shape" veri seti üzerinde de eğitilmiştir. Böylelikle iki farklı veri setinin sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca kıyaslama modelleri ve önerilem modelin başarımları her veri setinde farklı farklı değerlendirilmiştir

C. Kıyaslama modelleri

Önerilen modelin performansını karşılaştırmak için transfer öğrenme tekniği ile AlexNet, Vgg16, DarkNet19 olmak üzere üç model kullanıldı. AlexNet, 5 evrişimli katman ve onu takip eden 3 tam bağlantılı katmandan oluşmaktadır [24]. Resnet50 , 50 katmandan oluşan ve yaygın olarak kullanılan ESA modelidir. ResNet50, verilerin doğrudan girişten çıkış katmanına aktarılmasına olanak tanıyan kısayol bağlantısı kullanmaktadır. Bu sayede, derin öğrenmede performans düşüşü sorunlarının giderilmesine yardımcı olmaktadır [25-26].DarkNet19 , 64 katmandan oluşmaktadır. Ağ mimarisi incelendiğinde; 19 evrişimli katman, 18 toplu norrmalleştirme, 18 leakly ReLU, 5 maximum havuzlama, 1 global ortalama havuzlama, 1 softmax ve çıkış katmanından oluşmaktadır[27]. Bu modeller geliştirilirken kendi sınıflandırma görevleri için geliştirildiklerinden bu çalışma kapsamında XAlexNet, XVgg16 ve XDarkNet19 olarak isimlendirilmiştir. Bu özel modeller iki farklı veri seti üzerinde ikili görüntülerin sınıflandırılması için uygulanmıştır. Bu hedefle, bu modellerin sınıflandırmadan sorumlu üst katmanları oluşturulan modellere dahil edilmemiştir. Sınıflandırma katmanları yerine modelin tam bağlantılı (fully connected) katmanları, Şekil 4'de gösterildiği gibi temel katmanlardan sonra eklenmiştir.



Şekil 6. Kıyaslama modellerinin nasıl oluşturulduğuna dair bir örnek

IV. DENEYSEL SONUÇ VE TARTIŞMA

Önerilen model, XAlexNet, XVgg16 ve XDarkNet19 mimarileri 2 farklı veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan ilk veri seti kendi oluşturduğumuz "216 Shape" ve ikincisi ise "Shape 1070" veri setidir. Her iki veri seti de ikili görüntüden oluşmaktadır. Bu çalışma içerisinde kullanılan veri kümelerine ait bilgiler Tablo 2'de listelenmiştir. Makine öğrenmesi işlemlerinde veri setleri üç farklı kümeye ayrılır: (1) Modelin eğitimi için eğitim seti, (2) eğitimin etkisini ölçmek için doğrulama seti ve (3) modelin nihai doğruluğunu ölçmek için test seti kullanılır. Yapılan tüm deneyler için, her veri setinin %20'si test seti olarak kullanılmıştır. Veri setlerinin geri kalan kısmı şu şekilde kullanılmıştır: Kalan kısmın %20'si doğrulama seti ve %80'i eğitim seti olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak veri setlerinin %16'sı doğrulama, %20'si test seti ve %64'ü eğitim seti olarak kullanılmıştır.

Önerilen model ve kıyaslanan modeller, Windows 10 işletim sistemi üzerinde kurulu Matlab R2020 yazılımı üzerinde denenmiştir. Kullanılan bilgisayarın özellikleri ise; Intel i5, 2.9 GHz işlemci ve 8 GB Ram bellektir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan veri setlerine genel bakış

Veriseti	**Eğitim setindeki örnek sayısı**	**Doğrulama setindeki örnek sayısı**	**Test setindeki numune sayısı**	**Toplam örnek sayısı**
216 Shape	138	35	43	216
1070 Shape	685	171	214	1070

D. "216 Shape" veriseti ile yapılan deneyler

Önerilen model ve diğer kıyaslama modelleri "216 Shape" adlı ikili görüntülerden oluşan veri seti üzerinde eğitilmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca ezberlemeyi önlemek için çalışmada 10 k-fold çapraz doğrulama uygulanmıştır. XAlexNet, XVgg16, XDarkNet-19 ve önerilen ağ modelinin farklı hiperparametreler ile alınan doğruluk değerleri ve 10 k-fold çapraz doğrulama doğruluk değerleri Tablo 3,Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 3. XAlexNet modelinin 216 Shape veri setindeki doğruluk oranları

MiniBatchSize	MaxEpochs	InitialLearn Rate	Doğruluk	10 k-fold Çapraz Doğrulama
10	100	1e-3	0.0588	0.0588
10	100	1e-4	0.9412	0.9195
10	150	1e-4	0.9706	0.9160
10	200	1e-4	0.9412	0.9109
8	100	1e-4	0.9412	0.9101
6	100	1e-4	0.9706	0.9214
10	100	1e-5	0.8824	0.7294
10	100	1e-6	0.2647	0.2521

Tablo 4. XVgg16 modelinin 216 Shape veri setindeki doğruluk oranları

MiniBatchSize	MaxEpochs	InitialLearn Rate	Doğruluk	10 k-fold Çapraz Doğrulama
10	100	1e-3	0.9706	0.8496
10	100	1e-4	0.9412	0.7703
10	150	1e-4	0.7647	0.6731
10	200	1e-4	0.7941	0.7613
8	100	1e-4	0.8824	0.8523
6	100	1e-4	0.8529	0.8417
10	100	1e-5	0.1176	0.1765
10	100	1e-6	0.0588	0.0487

Tablo 5. XDarkNet19 modelinin 216 Shape veri setindeki doğruluk oranları

MiniBatchSize	MaxEpochs	InitialLearn Rate	Doğruluk	10 k-fold Çapraz Doğrulama
10	100	1e-3	0.9706	0.9340
10	100	1e-4	0.8824	0.8782
10	150	1e-4	0.8824	0.8580
10	200	1e-4	0.8824	0.8322
8	100	1e-4	0.9412	0.9160
6	100	1e-4	0.9412	0.8824
10	100	1e-5	0.1176	0.0106

10	100	1e-6	0.0672	0.0604

Tablo 6. Önerilen modelin 216 Shape veri setindeki doğruluk oranları

MiniBatchSize	MaxEpochs	InitialLearn Rate	Doğruluk	10 k-fold Çapraz Doğrulama
10	100	1e-3	0.4706	0.4133
10	100	1e-4	0.9412	0.9067
10	150	1e-4	0.9706	0.9429
10	200	1e-4	0.9412	0.9272
8	100	1e-4	0.9706	0.9512
6	100	1e-4	0.9706	0.9623
10	100	1e-5	0.9706	0.9473
10	100	1e-6	0.4412	0.4066

Tablolardaki veriler incelendiğinde, XAlexNet, XVgg16, XDarkNet19 ve önerilen ağ mimarilerinin doğruluk oranları ve 10 k-fold çapraz doğrulama doğruluk oranları arasında anlamlı bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni çapraz doğrulama tekniğinin kullanılmasıdır. K-fold çapraz doğrulama , veriyi belirlenen bir k sayısına göre eşit parçalara bölmekte ve bölünen her parçanın hem test hem de eğitim için kullanılmasını sağlamaktadır. Bu şekilde her bir ikili görüntü eğitim,test ve doğrulama verileri üzerinde kullanıldığı için hatalar en aza inmektedir. Bu tekniğin dezavantajı ise veri setlerinde hesaplama ve zaman açısından maliyetli olmasıdır.

E. "1070 Shape" veriseti ile yapılan deneyler

Çalışmada kullanılan "1070 Shape" veri setinde ise önerilen ağdaki sınıf sayılarına göre sınıflandırma başarımları incelenmiştir. Bu veri setinde toplamda 40 adet sınıf bulunmaktadır. Bu veri seti ile farklı sınıf sayıları ile alınan doğruluk oranlarındaki değişimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Önerilen ağ mimarisinin doğruluk oranları ve 10 k-fold çapraz doğrulama doğruluk oranları Tablo 7'de sunulmaktadır. Alınan sonuçlara bakıldığında bu veri seti için sınıf sayısı arttıkça sınıflandırma doğruluk oranlarında alınan sonuçlarda anlamlı düşüş görülmektedir.

Tablo 7. Önerilen ağ mimarisinin 1070 Shape veri seti üzerindeki sınıf sayısına göre doğruluk oranları

Sınıf sayısı (Minibatchsize 10, maxepochs 6, initiallearnrate 1e-4)	Doğruluk	10 k-fold Çapraz Doğrulama
15	0.9000	0.8714
20	0.8250	0.8093
25	0.7800	0.7617
30	0.7833	0.7644
35	0.7429	0.6921
40	0.7125	0.6788

V. ÇIKARIM

Derin öğrenme, son zamanlarda oldukça popüler hale gelen çok önemli araştırma alanlarından biridir. Sinir ağı temeline dayanan derin öğrenme alanında literatüre bakıldığında birçok farklı yöntem bulunmakta ve bunların bazılarının oldukça başarılı sonuçlar aldığı görülmektedir. Evrişimsel sinir ağları alanı da söz konusu önemli araştırma alanlarından biridir. Bu çalışmamızda, derin öğrenme tekniklerinden evrişimsel sinir ağlarında bulunan mimariler kullanılarak ikili görüntülerin sınıflandırma doğruluk oranlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın ilk bölümünde 17 sınıftan oluşan bir veri seti kullanılarak; AlexNet, VGG-16, DarkNet-19

ve kendi oluşturduğumuz ağın niteliklerinin değiştirilerek hangi mimarinin daha başarılı sonuçlar verdiğinin tespit edilmesi hedeflenmiş ve en başarılı ağın AlexNet olduğu görülmüştür.Buradaki amaç hiperparametrelerin ağın başarılarına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Alınan sonuçlara bakıldığında da hiper parametrelerin ağ başarılarındaki etkililiği görülmektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise 40 sınıftan oluşan bir veri seti kendi oluşturduğumuz ağ da farklı sınıf sayıları ile çalıştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında ise sınıf sayısının en yüksek değeri ile çalıştırıldığında en başarılı doğruluk oranının alındığı görülmektedir. Buradan çıkarılacak genel bir sonuç, sınıf sayısı arttırıldığında eğitim ve test veri sayısının da artmasıyla daha başarılı sonuçların alındığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] ARSLANKAYA, S., & TOPRAK, Ş. (2021). Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Algoritmalarını Kullanarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini. International Journal of Engineering Research and Development, 13(1), 178-192.

[2] Resul, D. A. Ş., Polat, B., & Tuna, G. (2019). Derin öğrenme ile resim resim ve videolarda nesnelerin tanınması ve takibi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(2), 571-581.

[3] Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). "Deep learning". Nature 521(7553), 436.

[4] Chen XW, Lin X. Big data deep learning: challenges and perspectives. IEEE Access. 2014; 2:514-525.

[5] Russ, J. C., Matey, J. R., Mallinckrodt, A. J., & McKay, S. (1994). The image processing handbook. Computers in Physics, 8(2), 177-178.

[6] L. Shuo, L. Guodong, W. Xiaoting and W. Lele, "Robustness Design of Logic or CNN Template for Binary Image," 2016 International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), Hunan, China, 2016, pp. 535-538, doi: 10.1109/ICSCSE.2016.0146.

[7] Q. Gao, P. Messmer and G. S. Moschytz, "Binary image rotation using cellular neural networks," 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353), Phoenix-Scottsdale, AZ, USA, 2002, pp. III-III, doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010173.

[8] Anderson, J. K. (2013). Cellular simultaneous recurrent networks for image processing. The University of Memphis.

[9] S. Mujawar, D. Kiran ve H. Ramasangu, "An Efficient w Architecture for Image Classification on FPGA Accelerator," 2018 Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC) , Bangalore, Hindistan, 2018, s. 1 - 4, doi: 10.1109 / ICAECC.2018.8479517.

[10] S. M. Chittajallu, N. Lakshmi Deepthi Mandalaneni, D. Parasa and S. Bano, "Classification of Binary Fracture Using CNN," 2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/GCAT47503.2019.8978468.

[11] Khandelwal P, Khandelwal A, Agarwal S. Using Computer Vision to enhance Safety of Workforce in Manufacturing in a Post COVID World. arXiv 2020, arXiv:2005.05287.

[12] C. Yang, L. Fang and H. Wei, "Learning Contour-Based Mid-Level Representation for Shape Classification," in IEEE Access, vol. 8, pp. 157587-157601, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019800.

[13] V. Patel, N. Mujumdar, P. Balasubramanian, S. Marvaniya ve A. Mittal, "Data Augmentation using Part Analysis for Shape Classification," 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) , Waikoloa, HI, ABD, 2019, s. 1223-1232, doi: 10.1109/WACV.2019.00135.

[14] GS Jayalakshmi ve VS Kumar, "Convolutional Neural Network (CNN) based Cancerous Skin Lesion Detection System," 2019 International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS) , Chennai, Hindistan, 2019, pp. 1-6, doi : 10.1109 / ICCIDS.2019.8862143.

[15] K. Ramanjaneyulu, K. V. Swamy and C. S. Rao, "Novel CBIR System using CNN Architecture," 2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India, 2018, pp. 379-383, doi: 10.1109/ICICT43934.2018.9034389.

[16] P. Wang, L. Li, Y. Jin and G. Wang, "Detection of unwanted traffic congestion based on existing surveillance system using in freeway via a CNN-architecture trafficnet," 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, China, 2018, pp. 1134-1139, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397881.

[17] Pal KK, Sudeep KS. Preprocessing for image classification by convolutional neural networks: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology (RTEICT 2016). Bangalore, India: IEEE; 2017. https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7808140.

[18] Nair V, Hinton GE. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines: Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML 2010). Madison, WI; 2010.

[19] Salimans T, Kingma DP. Weight normalization: a simple reparameterization to accelerate training of deep neural networks: Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems 29 (NIPS 2016). Barcelona, Spain; 2016.

[20] Zheng Y, Iwana BK, Uchida S. Discovering class-wise trends of max-pooling in subspace: Proceedings of 2018 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR). Niagara Falls, NY: IEEE; 2018.

[21] Shen, F., Shen, C., Zhou, X., Yang, Y., & Shen, H. T. (2016). Face image classification by pooling raw features. Pattern Recognition, 54, 94-103.

[22] Wang H, Yin J, Pei J, Yu PS, Yu JX. Suppressing model Overfitting in mining concept-drifting data streams: Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '06). Philadelphia, PA: ACM; 2006.

[23] Doan CHID, Liong S. Generalization for multilayer neural network Bayesian regularization or early stopping: Proceedings of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources 2nd Conference (APHW2004). Singapore; 2004.

[24] M. Çoşkun, Ö. Yıldırım, A. Uçar, and Y. Demir, "An overview of popular deep learning methods," European Journal of Technique, vol. 7, no. 2, pp. 165-176, 2017.

[25] F. Tempola, R. Wardoyo, A. Musdholifah, Rosihan and A. K. Nugroho, "Implementation of Deep Learning With Resnet50 Modification for Clove classification," *2023 IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS)*, Batu Malang, Indonesia, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITIS59651.2023.10419960.

[26] He, K., X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. 2016. "Deep Residual Learning for Image Recognition." Pp. 770–78 in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)

[27] W. Setiawan and A. Purnama, "Tobacco Leaf Images Clustering using DarkNet19 and K-Means," *2020 6th Information Technology International Seminar (ITIS)*, Surabaya, Indonesia, 2020, pp. 269-273, doi: 10.1109/ITIS50118.2020.9321035.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Çelik Hasir İçin Üretilen Soğuk Haddeleme İşlemi Uygulanarak İnceltilip Nervürlendirilmiş Çubuklarin Teorik Ve Mekanik Analizi

Halil ER[a], Mustafa YAŞAR[a]*

[a]Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye.
* **Halil ER:** halil.err@gmail.com

ÖZET *(Cambria, 10)*

Bu çalışmada, sürekli döküm yöntemiyle üretilmiş ve sıcak haddeleme işlemi uygulanan AISI 1008 kalite filmaşin malzemelerin mekanik özellikleri ve direnç kaynak edilebilirliliği çalışılmıştır. Bu malzemeler nervürlü çubuk haline getirmek için soğuk haddeleme işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra farklı çaplarda nervürlü çubuklar elde edilmiştir. Elde edilen çubukların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. Mekanik testler sonucunda, %10'a kadar yapılan soğuk çekme işlemiyle çap inceltme işlemi yapılan nervürlü çelik çubukların TS4559 çelik hasır standardına (max. çekme gerilmesi ≥ 550 N / mm² ve max akma gerilmesi ≥ 500 N / mm²) göre yeterli mekanik özelliklere sahip olmadığı tespit edilmiştir. %10 ve daha yüksek çap inceltmelerde yeterli mekanik özelliklerine ulaşılmıştır. Bu çubuklar daha sonra çelik hasır kaynak makinası kullanılarak direnç kaynak işlemi yapılmış ve bu direnç kaynak noktalarının etkisini incelemek için kaynaklı çubuklara çekme testi uygulanmıştır. Çekme test sonuçlarına göre %10 ve üzerinde çap inceltme ile elde edilen nervürlü çeliklerin kaynaklı hali de yeterli mekanik özellikler göstermiştir. Ayrıca kaynak esnasında nervürlü çubuklarda oluşan sıcaklık ve gerilim dağılımını incelemek amacıyla ANSYS WORKBENCH program kullanılarak mekanik model birebir modellenmiş , AISI 1008 malzeme özellikleri (termal,elektrik ve mekanik) programa tanımlanarak direnç kaynağı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Nervürlü çubukların mekanik özelliği, Punto kaynak, Soğuk haddeleme*

Theoretical and Mechanical Analysis of Thinned and Ribbed Bars Produced for Steel Wire Mesh by Cold Rolling Process

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

In this study, the mechanical properties and resistance weldability of AISI 1008 grade wire rod materials produced by continuous casting method and hot rolled were studied. These materials were subjected to cold rolling process to form ribbed bars and then ribbed bars of different diameters were obtained. Tensile tests were performed to determine the mechanical properties of the bars. As a result of the mechanical tests, it was determined that the ribbed steel bars with diameter thinning by cold drawing up to 10% did not have sufficient mechanical properties according to TS4559 steel mesh standard (max. tensile stress ≥ 550 N / mm2 and max. yield stress ≥ 500 N / mm2). 10% and higher diameter thinning achieved sufficient mechanical properties. These bars were then resistance welded using a steel mesh welding machine and a tensile test was applied to the welded bars to examine the effect of these resistance welding points. According to the tensile test results, the welded state of the ribbed steels obtained with a diameter reduction of 10% and above also showed sufficient mechanical properties. In addition, in order to examine the temperature and stress distribution in the ribbed bars during welding, the mechanical model was modeled one-to-one using ANSYS WORKBENCH program, AISI 1008 material properties (thermal, electrical and mechanical) were defined in the program and resistance welding analysis was performed.

Keywords: *Mechanical properties of ribbed bars, spot welding, cold rolling*

I. GİRİŞ

Dairesel kesitli bir ürün olarak sıcak haddeleme yöntemi ile ergitilerek içerisine farklı oranlarda karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn), fosfor (P), azot (N), alüminyum (Al) gibi elementlerin yapısına katılarak kangal olarakta adlandırılan bobin şeklinde sarılarak farklı özelliklerde elde edilen sıcak haddeleme ürününe '' filmaşin '' olarak isimlendirilir. Filmaşinler içeriğinde bulunan elementlerin oranlarına göre farklı mekanik özellik göstermektedir. Bu filmaşinlerin adlandırılması ve kodlara bölünmesinin başlıca sebebi ise içeriğinde bulunan karbon miktarıdır. 1008__00 koduyla belirtilen filmaşinlerin içeriğinde maksimum %0,1 oranında karbon bulunmaktadır.İlgili standartı SAE J 403 düşük karbonlu çeliklerdir.

Soğuk çekme işlemi farklı yöntemler ile farklı metodlar ve haddeleme sistemi ile uygulansada çelik hasır nervürlü çubugu üretimi 3 adet nervür disklerinin 120 derece açıyla birleşimi ve bu birleşim yerinden ezme ve çekme işlemi birlikte uygulanarak yapılmaktadır. Kullanılan filmaşinlerin kesitinde daralma meydana gelirken bir yandan da düz olan yüzeye nervür basılarak yüzey alanı artırılmış olur. Bu soğuk haddeleme yöntemi malzemeyi deformasyona uğratarak inkülizyonların artmasıyla tane yapısı yassılaşarak sertleşme ve mukavemet artışı meydana gelmiş olmaktadır. Filmaşinlere kıyasla yaklaşık uygulanan soğuk haddeleme oranlarına değişiklik göstermesine ragmen en az %40 çekme mukavemeti artması, akma mukavetleri ise %80 ' e varan oranlarda artırılması istenilmektedir. Uzama miktarı ise %40 ile %100 oranlarında değişen haddeleme oranına bağlı olarak filmaşinlerde düşüş görünmektedir.

Kaynaklanabilirlik özelliği soğuk çekmeden elde edilmiş nervürlü çubukların düğüm noktalarında ki kopma dayanımlarının hesaplanan degerleri ile karşılaştırılarak gözlenmiştir.

II. MATERYAL METOT

Soğuk haddeleme çelik üretiminde önemli bir yere sahiptir. Soğuk çekme işlemi de tel üretimi için önemli olup sıcak haddeleme ile elde edilen çeliğin akma ve çekme mukavemet değerlerinin yükselmesini sağlarken diğer yandan haddeleme kuvvetini ve gücünün yüksek olması gerekir bu nedenle dezavantaj olarak büyük ekipman büyük motorlar ve yüksek güç gereklidir. Birçok uygulamada sıcak haddelenmiş çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirdiği için tercih sebepleri arasındadır.

Soğuk haddelemede kullanılan çeliklerde ve filmaşinlerde yüksek karbon oranları tercih edilmezken düşük ve orta karbonlu çelikler tercih edilmektedir.

Soğuk çekme işlemi sonrasında çeliğin akma ve çekme mukavemetleri, mekanik özelliklerinde iyileşme ve yükselme sebebi işlem sertleşmesi ya da pekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Soğuk işlem sırasında kullanılan filmaşinin üzerindeki etkilerini sıralayabiliriz. Bunlardan başlıcaları

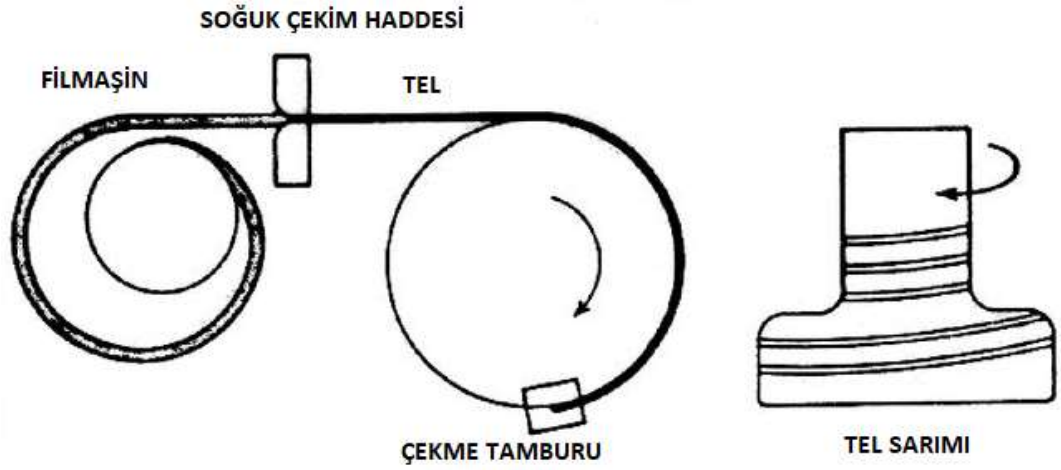
- Mukavemet ve dayanım artar
- Dislokasyonlar ve sertleşme artar
- Tane şekilleri değişerek yassılaşır
- Iç gerilmeler oluşur
- Sıcak haddeleme yüzey hataları giderilir
- Ebatlama ve gramaj çap istenilen şekilde ayarlanabilir
- Süneklik azalır

Soğuk işlem deformasyon oranı ile mukavemet artışı orantılı olarak artarak gerçekleşir. Bu artışları akma çekme deneyleri kısmında gösterilmiş olup soğuk işlem miktarına bağlılığı gözlemlenmiştir.



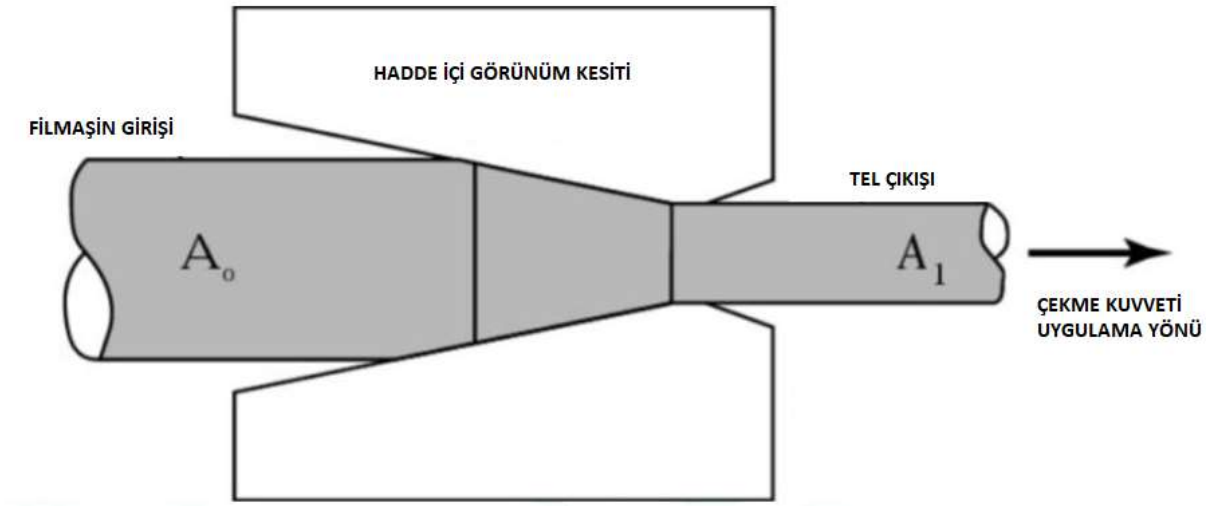
Şekil. 1 Filmaşin görüntüsü

Başlangıçta belirli bir çap ve şekilde gelen çeliğin hadde silindirleri, diskleri ve benzeri yöntemler kullanılarak istenilen nihai sonucu ulaşana kadar sürekli olarak deformasyona uğratılma işlemine denilmektedir. Bu yöntem çelik hasır üretimi için özel olarak kullanılmaktadır. 3 ezme ve nervürleme diski 3 eksende 120 derece açı kullanılarak filmaşin orta noktadan geçirilir. Filmaşin hem haddeleme hemde nervürleme yapılarak düzeltilip nervürlü çubuk olarak istenilen ebatta kesilir. Genel soguk haddeleme işlemi saç üretimlerinde silindir ezme ve çubuk mil vb üretimlerde ise haddeleme tel çekme haddesi kullanılarak işleme yapılır.



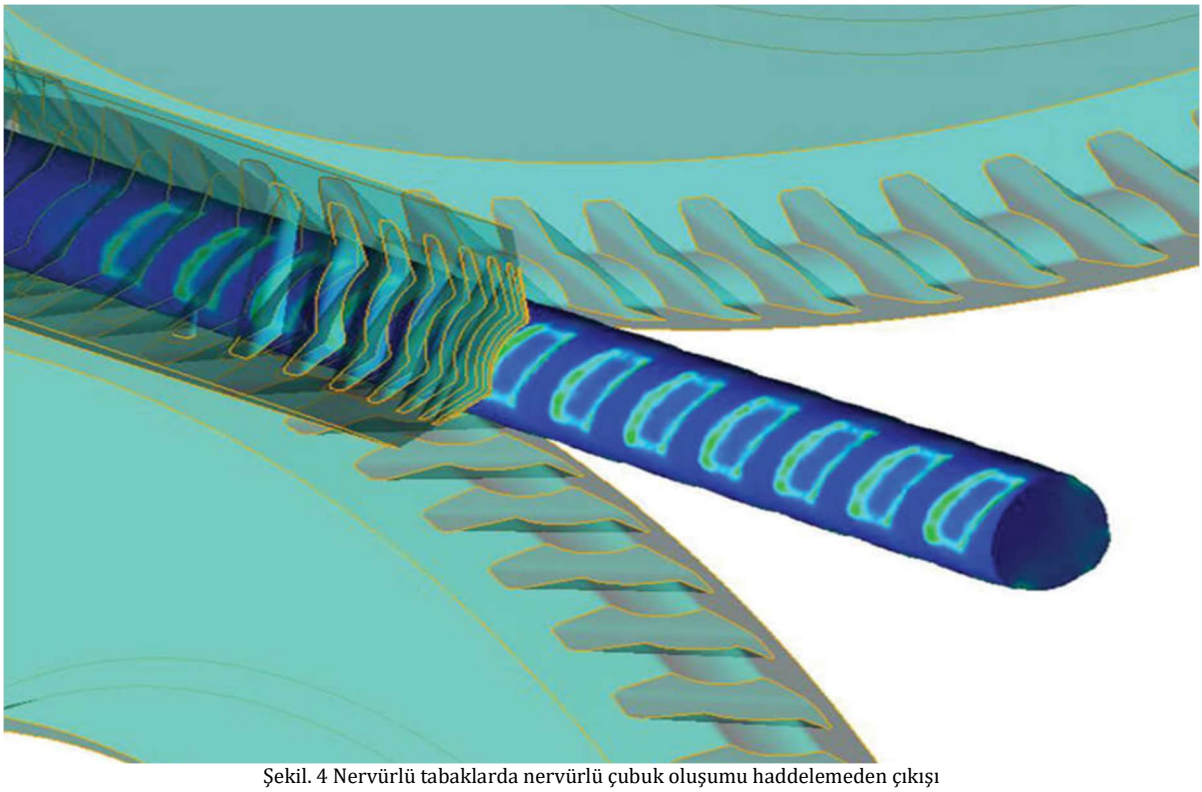
Şekil. 2 Soğuk çekme haddeleme tipi

Soguk çekme haddesi yukarıda görüldügü üzere filmaşinden çekme tamburu yardımı ile tambura sarılarak çekme kuvveti uygulanarak çekilir bu çekme işlemi sırasında ise arada bulunan soğuk çekim haddesi içinden geçer bu geçme işlemi sırasında inceltme işlemi gerçekleşir.



Şekil. 3 Soğuk hadde filmaşin girişi ve çıkışı görüntüsü

Filmaşin şekilde görüldüğü üzere A_0 çapında haddeye girerken hadde çıkışı tel A_1 çapına düşürülmektedir. Bu haddeleme tel ve mil benzeri ürünlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır.



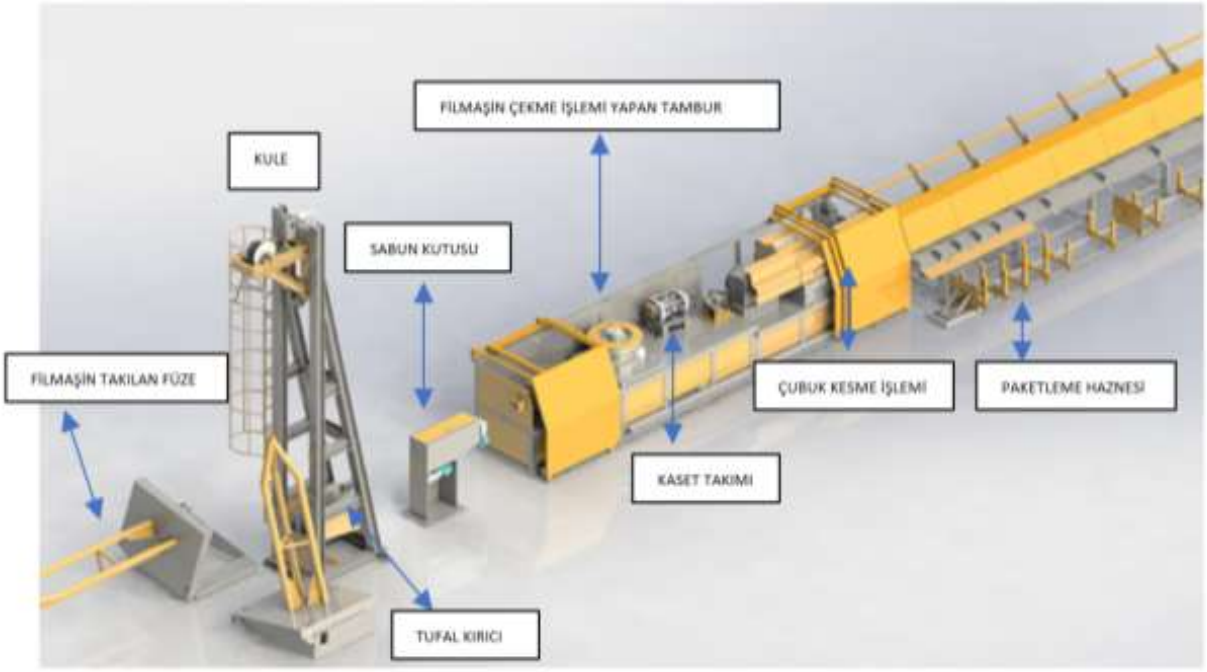
Şekil. 4 Nervürlü tabaklarda nervürlü çubuk oluşumu haddelemeden çıkışı

3 farklı eksende oluşan bu eşit mesafelerde ayarlanan ezme hadde ve onlara zıt yerleştirilen 3 farklı eksende nervürleme hadde ise meydana gelmektedir. Bu haddeleme tipi özellikle ezme haddeleme olarak değinilecektir.

Çelik hasırda kullanılan filmaşinin belirli kalitelerde olmasının nedeni de çelik hasır için soğuk çekme işlemi ile üretilen nervürlü çubuk demirlerin belirli kaliteyi sağlamanın yanı sıra soğuk çekme işleminde kolaylık ve sürekliliği sağlanması ve ardından elde edilen nervürlü çubukların da birbirlerine kaynaklanma kalitesinin yüksek olması gibi birbirini takip eden belirli prosesleri vardır.İnceltmeye giren filmaşin 5,5 mm çapında kangallardan başlar. Bu kangallar inceltme nervürleme ve doğrultma ve kesme işlemlerine tabi tutularak istenilen inceliğe, gramaja ve istenilen uzunlukta, boyda kesilerek paketlemesi yapılmaktadır.

A. Soğuk Hadde Düzeni

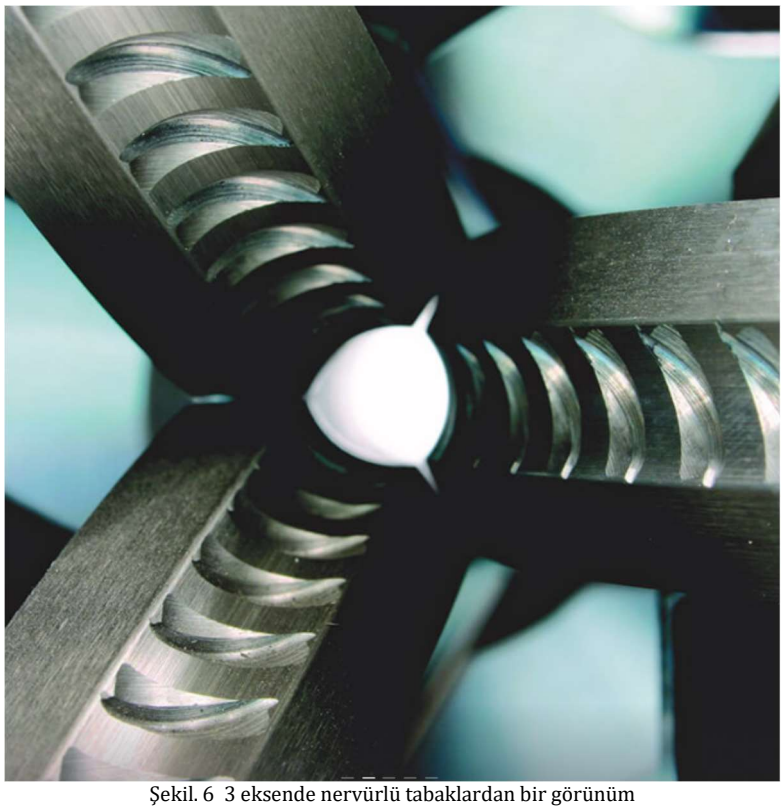
Soğuk haddeleme ve nervürleme işleminde genel olarak ham maddenin yerleştirildiği füze adı verilen bobin şeklinde üretilen filmaşinin konuldugu bobin yuvası ile başlamaktadır. Filmaşinler önce yüzeylerinde bulunan kılcal çatlakların sıcak haddeme işleminin ardından soguması esnasında yüzeyde oluşan tufalların ve tozların giderilmesi için bir seri makaralardan geçirilerek yüzeyin temizlenmesi sağlanır. Yüzeyi temizlenen filmaşin daha sonra hadde ile filmaşin arasında yüzey gerilmesinin ve sürtünmelerin azalması ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla sabunlama işlemine tabi tutulur. Sabunlanan filmaşin teli önce inceltme disklerinin bulunduğu ezme işlemini yapacak olan haddeye aktarılır. Bu ezme işleminde 3 adet disk bulunur ve 3 adet disk 120 derece açıyla birbirini tamamlayarak birleşim noktasındaki boşluktan filmaşin teli geçirilir. Bu işlemde bu 3 ezme diski filmaşinin çapına göre ve istenilen nihani ürüne göre ayarlanarak baskı işlemi yapar. 3 eksende uygulanan diskler birbirlerinden bagımsız 3 ayrı motorda bağlı bulunmaktadır. 3 ayrı motor tek bir sistemde birbiri ile aynı şekilde çalışmaktadır. Bu 3 motor istenilen hıza göre istenilen torka göre ayarlanabilmektedir. Ezme işlemi sırasında filmaşin deformasyona ugrar bu deformasyon sırasında yapısında bulunan inklüzyonlar artarak birbirlerine engel olan bir yapı oluşturur taneciklerin bağlanma şekil düzeni bozularak yassılaşma meydana gelir bunların sonucu ile mamül hem incelmiş hemde mukavemetinde artış meydana gelir. Ezme işlemi ardından nervürleme disklerine geçen filmaşin aynı mantıkla 3 eksenden 3 nervürleme diskine girer. Burada incelmiş ve mukaveti artırılmış olan filmaşine nervürleme işlemi uygulanır. Nervürleme işlemi filmaşinin yüzeyinde belirli açı, belirli aralıkla ve belirli yükseklikte girinti oluşturur. Bu işlemde filmaşin mukavemeti biraz daha artarken yüzey alanı artmış ve nihani kullanım yeri olan betonarme yapıda betonların içerisinde tutuculugu artarak beton içerinden sıyrılarak ayrılması engellenmiş olmaktadır. Bu nervürleme işleminin ardından bir dizi makara sisteminin ortasından geçerken nervürlenen telin düzgün olması sağlanır ve en son işlem olan istenilen ebatta uzunlukta kesim yapılmaktadır. Bu kesim işlemi makara üzerinde belirli bir noktada duran bıçak sürekli dönmektedir. Tel istenilen ebata ulaşında sürekli dönmekte olan makara piston yardımıyla ile alınarak telin üzerine gelir ve kesim işlemi gerçekleşir. Bu kesim işlemi bıçak, piston, encoder ve bilgisayar sisteminden oluşmaktadır. Kesim işlemi bittikten sonra haznede biriken çubuklar istenilen ebata geldikten sonra makina kapatılarak çubuklar hazneden toplanır.



Şekil. 5 Soguk haddeleme makinası genel görünümü.

B. Ezme Haddeleme

Sert metalden üretilen disklere denilmektedir. Bu diskler kaset takımının içine üç eksende birleşecek şekilde yerleştirilir. Disklerin ezme disk üçlüsü olarak işleme başlar ve ovalama yuvalama nervürleme gibi ayrı ayrı görevleri vardır. Bu diskler karşılıklı olarak 3 er adet takımlar halinde 3 eksende birbirlerine 120^0 açı mesafesi ile çalışmaktadır.



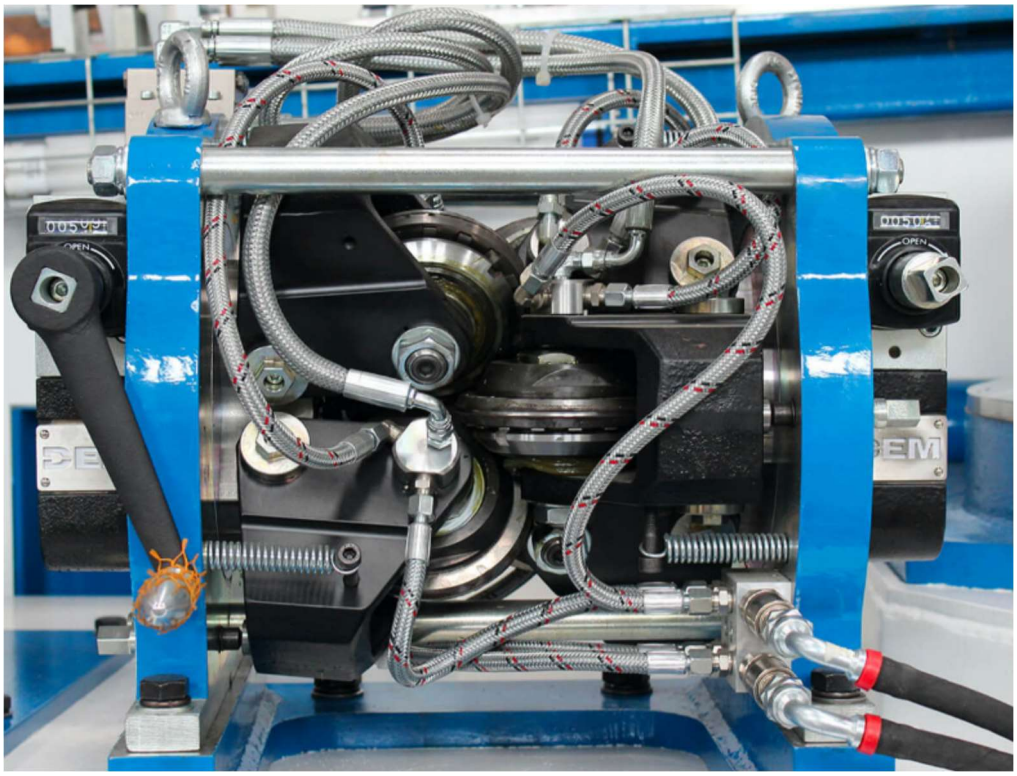
Şekil. 6 3 eksende nervürlü tabaklardan bir görünüm

Kaset takımlarının içine yerleştirilen tabaklar belirli üç eksende birbirlerine eşit şekilde yaklaşıp uzaklaşmaktadır. Ayar kolu sayesinde eşit şekilde hareket ederek birleşim noktasından tel geçmektedir. Tel geçme işlemi sırayla olup sıkıştırma basma kuvveti ile dik doğrultuda çekme kuvvetine maruz kalarak istenilen gramaja çapa göre ayarlanabilmektedir. Bu tabakların belirli çapları vardır hangi çapta çubuk üretimi yapmak istiyorsak tabakları da bunlara göre ayarlamamız gerekmektedir.



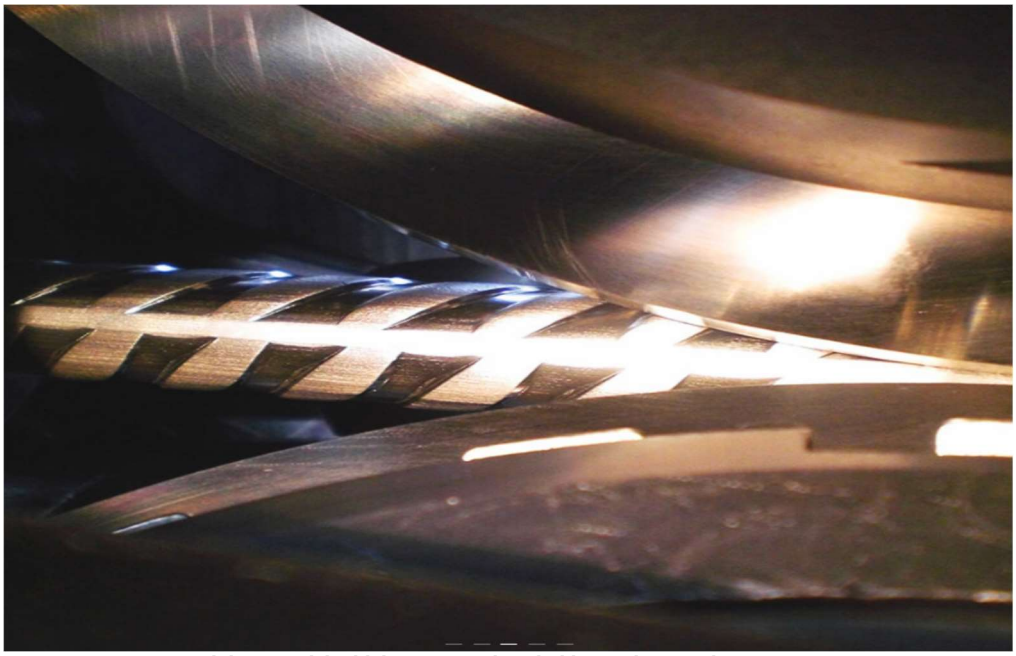
Şekil. 7 Soğuk haddeleme tabakları düzenleme ve yerleştirme için kullanılan kaset takımlarına ait görüntü

Kaset takımları ayarlaması yapılırken tabakları üç eksenden birbirini karşılamalı açıklıkları eşit miktarda olduğu iyi bir şekilde kontrol edilmelidir. Tabakların birbirine değmemesi gerekmektedir çok ince bir hizada çalışan tabaklar bir tanesi ekseni kaçık bir şekilde çalıştırılırsa tabaklar birbirine zarar vererek kırılma ihtimalleri çok yüksektir. Kaset takımlarından geçirilen telin fazla çekme kuvvetine maruz kalarak teli kopartabilir. Birinci paso olarak geçen birinci kaset takımında kullanılan ovalama (RO) ve yuvalama (RT) tabakları karşılıklı üçlü diskler halinde çalışarak inceltme işleminin ilk başlangıç yeridir.


Şekil. 8 Kaset takımlarından bir görünüm

Bu disklerin yüzeylerine bakarsak yuvarlak yuvalarını görmekteyiz bu yuvalar üç eksende bir daire şeklini oluşturarak bu daireden tel geçerken yüzeyinde sıcak döküm esnasında oluşan hatalar giderilir hem de tel istenilen çapa düşürülme işlemi başlamış olur. Kaset takımının yan tarafında bulunan sayaçlı

kol ile tabakların ince ayarı yapıldıktan sonra tel haddeleme işlemi başarı ile gerçekleşir. Sarım yapılan tambur sayesinde çekme kuvveti iki ye bölünerek tel üzere tek seferde fazla çekme kuvveti uygulaması engellenir 1.5 mm'den daha fazla tel inceltmeyi sağlık bir şekilde gerçekleştirmek istiyorsak tambur kullanmakta fayda vardır. Tamburun alt kısmında kapalı alanda dişli sistemine bağlı olarak güçlü bir motor bulunur. Tambur bu motor dişli sisteminin yardımıyla döner bu dönme esnasında teli çekerek etrafına sarar ilk kaset takımına uygulanan çekme kuvveti burada tambur sayesinde meydana gelir tamburdan çıkan tel tekrardan kaset takımına verilir bu kaset takımında nervürleme işlemi yapılmaya başlar ve bu nervürleme için gerekli olan çekme kuvveti de kaset takımında ardında bulunan çekme tabakları sayesinde gerçekleşir. Bu işlem sırasında tambur ortadan kalkarak iki kaset takımı ardışık çalışabilir veya bir tane değil çift tambur kullanılarak aynı işlem yapılabilir bu tambur işlemi kullanılan filmaşin ve istenilen nihai tel çubuğun çapına göre karar verilerek makine ayarları tambur sayıları, kullanılan rulo tabaklar değişerek ve farklı yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Sonuç olarak soğuk çekme işlemi hangi şekilde kaç etapta, kaç diskte yapılırsa yapılsın TS standartlarına uygunluğunu korumaktadır.



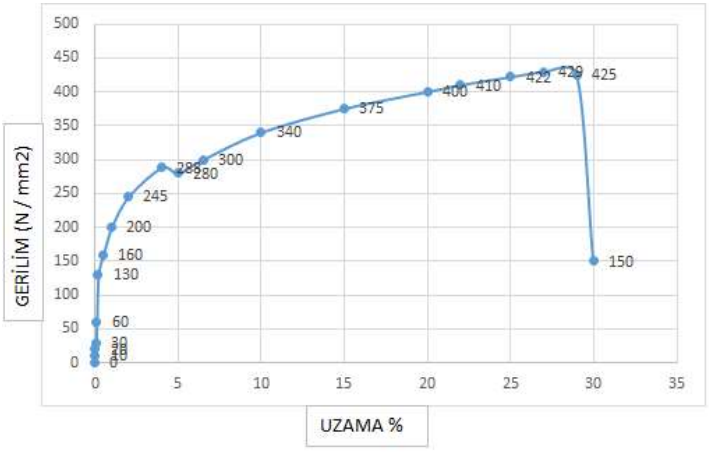
Şekil. 9 Soğuk haddeleme nervürlü çubukların çıkış anında görüntüsü

C. Çekme Testi Sonuçları

Üretimde kullanılan yarı mamul ürün olan filmaşin çap ve akma ve çekme mukavemetleri aşağıda bulunan tabloda yer verilmiştir. Tabloda yer alan değerler deneyler sonucu elde edilmiştir.Aşağıda bulunan tablolarda 8 mm filmaşin hammadde olarak kullanılarak 6,5 mm, 7,0 mm, 7,50 mm çaplarında soğuk haddeleme işlemi uygulanarak nervürlü demir çubuklar elde edilmiştir. Bu nervürlü çubukların akma mukavemetleri, çekme mukavemetleri ve uzama oranlarında artışlar görülmüştür.

Tablo 1. 8 mm filmaşin deney sonuçları.

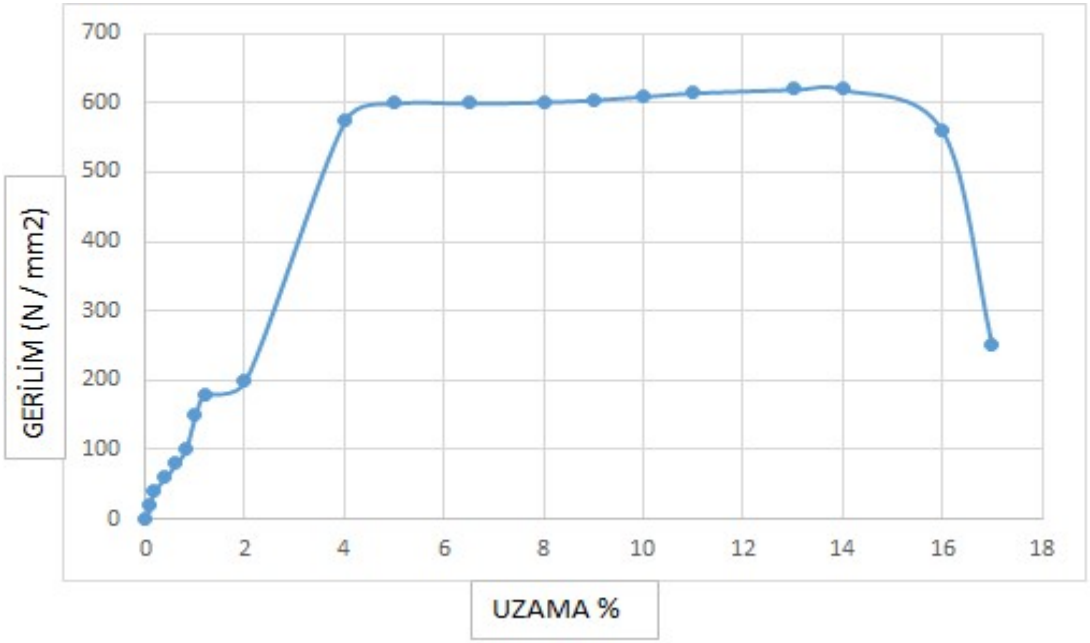
DENEY SAYISI	FİLMAŞİN ÇAPI	BİRİMİ	%C ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ	BİRİMİ	AKMA MUKAVEMETİ	BİRİMİ	UZAMA %
1	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
2	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
3	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
4	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29



Şekil. 10 8 mm filmaşin gerilim-uzama grafigi.

Tablo 2. 6.5 mm nervürlü çubukların deney sonuçları.

NERVÜRLÜ ÇUBUK		AKMA GERİLMESİ		MAX GERİLME		UZAMA %	DEFORMASYON ORANI	AKMA MUKAVEMETİ ARTIŞ ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ ARTIŞ ORANI	UZAMA MİKTARINDA AZALMA ORANI
6,50	mm	573	N/m m2	610	N/m m2	15,5	20%	98,9%	42,19%	87%
6,50	mm	577	N/m m2	618	N/m m2	14,5	20%	100,3%	44,05%	100%
6,50	mm	579	N/m m2	615	N/m m2	17	20%	101%	43,35%	70%
6,50	mm	558	N/m m2	597	N/m m2	11	20%	93,7%	39,16%	160%



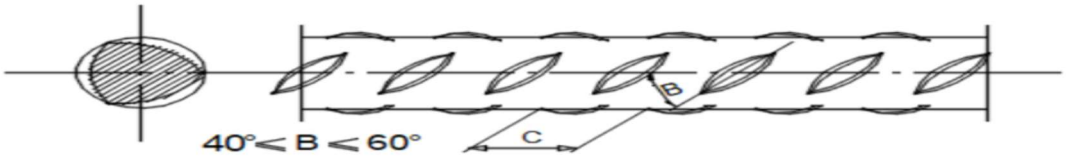
Şekil. 11 6,5 mm nervürlü çelik çubuk gerilim-uzama grafigi.

Karabük üniversitesi Türk Akreditasyon Kurumu tarafından onaylı Demir Çelik enstitüsü malzeme araştırma ve geliştirme merkezi laboratuvar sonuçları kullanılarak alınan bilgilerde , yapılan deneylerde yarı mamülün mamüle dönüşmesi esnada uygulanan soğuk haddeleme işlemesi sırasında 8 mm filmaşin kullanılarak elde edilen ve tablo 2.'de görüldüğü üzere kesitin %20 oranında azalma dislakasyonları artırarak akma ve çekme dayanımlarında ciddi oranda yükselmeye neden olmuştur.Filmaşinin %20 deformasyon ile elde edilen nervürlü çubukların akma mukavemetinin tablo 2.'de görüldüğü üzere

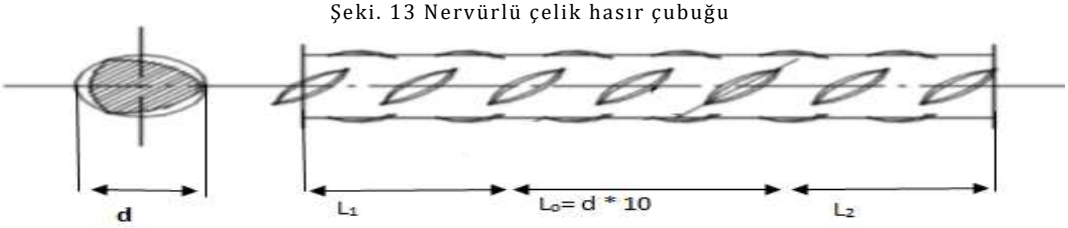
yaklaşık %100 oranında çekme mukavemeti ise yaklaşık %40 oranında artış gözlenirken uzama oranında ise ortalama %100 e yakın bir azalma gözlenmiştir. Soğuk haddeleme sırasında kesit daralması deformasyon oranı arttıkça akma dayanımı ve çekme dayanımını arttırmıştır.



Şekil. 12 Nervürlü çelik hasır çubugun çekme testinden sonra fotografı.



Şeki. 13 Nervürlü çelik hasır çubuğu



Şekil. 14 Nervürlü Çelik çubugu numune alma

d= nervürlü çelik çubuk çapı
L_1=L_2= Çekme cihazi çene mesafesi
L_0= d*10

Bir diğer deneyde ise aynı filmaşin kullanılarak elde edilen farklı çaptaki nervürlü çubugun akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve uzama miktarlarında ki sonuçların nasıl değiştiği tablo 3'de gözlenmiştir.

Tablo 3. 8 mm filmaşin deney sonuçları.

DENEY SAYISI	FİLMAŞİN ÇAPI	BİRİMİ	%C ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ	BİRİMİ	AKMA MUKAVEMETİ	BİRİMİ	UZAMA %
1	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
2	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
3	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
4	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29

Tablo 4. 7 mm nervürlü çubuk deney sonuçları.

NERVÜRLÜ ÇUBUK		AKMA GERİLMESİ		MAX GERİLME		UZAMA %	DEFORMASYON ORANI	AKMA MUAKAVMETİ ARTIŞ ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ ARTIŞ ORANI	UZAMA MİKTARINDA AZALMA ORANI
7	mm	519	N/mm2	557	N/mm2	19,5	12,50%	80%	30%	49%
7	mm	527	N/mm2	566	N/mm2	21	12,50%	83%	32%	38%
7	mm	527	N/mm2	579	N/mm2	19	12,50%	83%	35%	52%
7	mm	527	N/mm2	577	N/mm2	20	12,50%	83%	34%	45%

TS 4559 standartlarına göre uygunluk oranı akma sınırını 500 N / mm^2 çekme sınırının 550 N/mm^2 minimum sınırlardır.

8 mm filmaşin kullanılarak soğuk haddeleme ve nervürleme işlemine tabi tutularak üretilen 6,50 mm çapında nervürlü çubuklar ile 7,00 mm çapında nervürlü çubukların analizleri uygunluk vermekte olduğu deneyler ile gözlenmiştir.

Deformasyon oranları göz önüne alınarak ve TS4559 standartlarının sınır akma ve çekme değerleri kıyaslama yapıldığında 8 mm 1008 kalite filmaşin kullanılarak %12,50 oranında deformasyon güvenlik sınırlarına çok yaklaştığı gözlenmiştir. Bu sınır değerlerin altında üretimin mümkün olmadığı düşünülürse %12,50 deformasyondan daha az yapılan soğuk haddeleme işlemi çelik hasır üretiminde kullanılmaması gerektiği düşülmektedir.

Bunun içinde 8 mm filmaşin kullanılarak %7,14 oranında bir deformasyonla elde edilmiş 7,50 mm çapında nervürlü çubuğun analizi aşağıda tablo 6.'da gösterilmektedir.

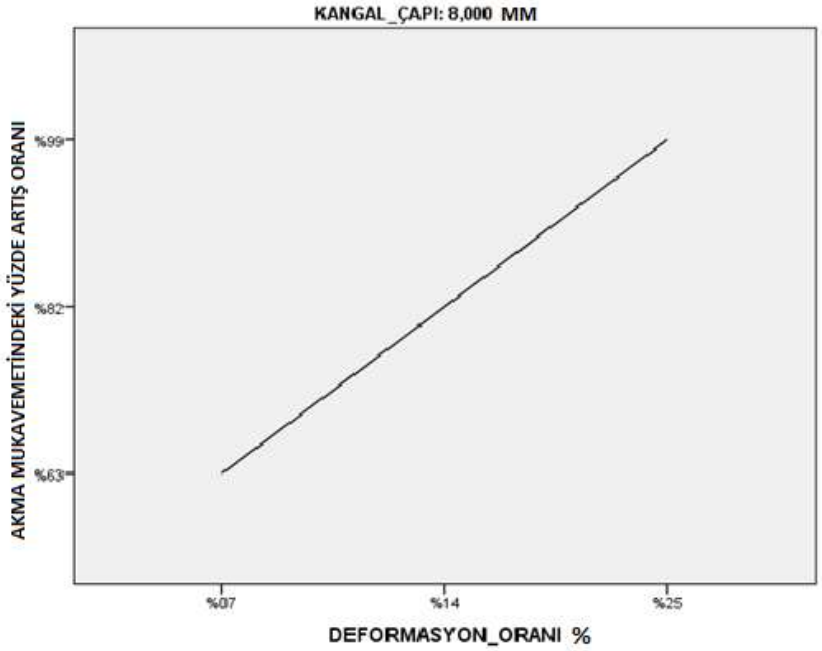
Tablo 5. 8 mm filmaşin deney sonuçları.

DENEY SAYISI	FİLMAŞİN ÇAPI	BİRİMİ	%C ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ	BİRİMİ	AKMA MUKAVEMETİ	BİRİMİ	UZAMA %
1	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
2	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
3	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
4	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29
5	8,00	mm	0,01	429,00	N/mm2	288,00	N/mm2	29

Tablo 6. 7,5 mm nervürlü çubukların deney sonuçları.

NERVÜRLÜ ÇUBUK		AKMA GERİLMESİ		MAX GERİLME		UZAMA %	DEFORMASYON ORANI	AKMA MUKAVEMETİ ARTIŞ ORANI	ÇEKME MUKAVEMETİ ARTIŞ ORANI	UZAMA MİKTARINDA AZALMA ORANI
7,50	mm	475	N/mm2	528	N/mm2	22,50	7,14%	65%	23%	29%
7,50	mm	468	N/mm2	517	N/mm2	23,00	7,14%	62,5%	20,5%	26%
7,50	mm	465	N/mm2	514	N/mm2	17,50	7,14%	61,5%	20%	65%
7,50	mm	476	N/mm2	526	N/mm2	18,00	7,14%	65%	22,6%	61%
7,50	Mm	462	N/mm2	514	N/mm2	19,00	7,14%	60%	20%	52%

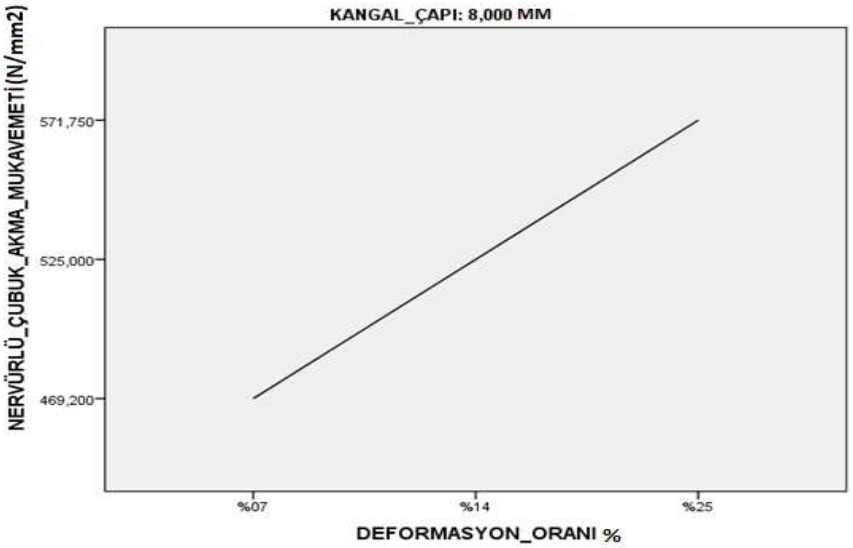
8 mm filmaşin kullanılarak soğuk haddeleme ve nervürleme işleminde %7,14 oranında deformasyona ugratılarak elde edilmiş nervürlü çubukların akma mukavemet ortalama 470 N/mm^2 olarak elde edilmiş vetablo 6 da verilmiştir. TS4559 standartlarında verilen 500 N / mm^2 sınır değerinin altında kalarak uygun olmadığı anlaşılmıştır. Çekme mukavemet ortalaması ise yaklaşık 520 N/mm^2 gelerek TS4559 standartında verilen 550 N / mm^2 sınır değerinin altında kalarak uygun olmadığı gözlenmiştir.



Şekil. 15 8 mm filmaşin kullanılarak elde edilmiş nervürlü çubuklarda deformasyon arttıkça akma miktarındaki artışı gösteren grafik.

Grafikte görüldüğü üzere deformasyon oranı %7, %14, %25 miktarında arttıkça akma mukavemet miktarında %63, %82, %99 oranında artış olduğu gözlenmiştir. Sınır değerleri kontrol edilerek deformasyon miktarı artırılarak üretim yapılmalıdır.

Deneylerde 8 mm filmaşin kullanılarak elde edilen nervürlü çubukların %12,5 civarına kadar yapılan deformasyonlar yaklaşık sınır değerlere ulaştığı görüldüğü üzere deformasyon oranının bu değerlerden yukarıda yapılması istenilmektedir.



Şekil. 16 8 mm filmaşin kullanılarak elde edilmiş nervürlü çubuklarda deformasyon arttıkça akma mukavemetindeki artışı gösteren grafik.

Deformasyon oranına göre kontrol edildiğinde % 12,5 oranına karşılık gelen akma sınırının 500 kN değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Deformasyon miktarı arttıkça doğrusal olarak akma mukavemeti de artmaktadır.

D. ÇELİK HASIR ÜRETİMİ

Çelik hasır yapı malzemesi olarak kullanılan bir donatı çeşitidir. Yapılarda kaynaklı donatı olarak tercih edilmektedir. Kullanım alanları binalarda zemin, çatı, duvar, saha alanı yapımı gibi bölümlerde kullanılırken tünellerde, köprülerde, yol yapımında, kanal yapımında, havalimanı pisti endüstriyel ve sivil binalarda askeri alanlarda barajlar gibi bir çok alanda kullanımı mevcüttür. Çelik hasır günümüzde kullanımı yaygın olarak görülürken gün geçtikçe kullanımı da artmaktadır. Deprem bölgelerinde, toki inşaatlarında bir çok bölümünde çelik hasır kullanılmaktadır. Hem işçilik maliyeti yönünden tasarruf sağlanması hemde yapım işlerinin hızlı ve güvenilir olması açısında çelik hasır inşaatlarda önemli bir yer tutmaktadır. Nervürlü çubukların kaynaklanarak bir ağ şeklinde imalatı betonarme yapının iskeletini oluşturmaktadır.

Üretim süreci bilgisayar teknolojisinin ve akıllı sistemlerin gelişmesiyle günümüz teknolojisi ile özel imalat makinaları kullanılarak yapılmaktadır. Kaynak teknolojisi direnç nokta kaynağı olan sistemlerde küçük çaplı nervürlü çubukların kaynak alanları esas alınarak otomatik sistemler yardımıyla aynı anda bir çok nokta direnç kaynağı yapılmaktadır. Hem yüksek veririmlilik hemde üretim sistemlerinin bir çok alana hitap ederek ihtiyacı karşılaması için uygun tasarlamış olan makinalar kullanılmaktadır. Kaynak yapılacak olan nervürlü çubukların çaplarının düşük olması, boyuna ve enine nervürlü çubukların birleşim alanlarının kesiştiği noktalarda yapılan nokta direnç kaynagının kalitesi ile hesap edilmesi gerekmektedir.

Akım, kaynak süresi ve sıcaklık gibi değerler genel bir formül kullanılarak hesap edilemezler çok değişkenli parametrelere sahip olan bu işlemler bir çok değişken etkiyi bir arada barındırır. Kullanılan elektrotlar her kaynaktan sonra değişkenlik gösterir kullanılan nervürlü çubugun her kaynak noktası alanı farklılık gösterir ortam sıcaklıkları trafo ömürleri gibi bir çok etken vardır. Ancak genel bir formul ile açıklama yapmak istersek şu şekilde özetleyebiliriz. Pratikte bu tür parametrelerin belirlenmesi genellikle deneysel çalışmalara veya malzeme bilimine dayanarak optimize edilir.

$Q = I^2Rt$ formülü ile kaynak kontrolünün ana elektrik parametleri voltaj, direnç ve akımdır.
Q=Üretilen ısı miktarıdır. (watt-saniye)
I=Akım (amper)
R=Toplam direnç (ohm)
t= zaman (saniye)

Bu formul de kullanılan direnç değerleri bir çok etki eden malzemeyi içerdiğinden dolayı çok değişkenlidir.

$R = \frac{\mathrm{qL}}{\mathrm{A}}$ olarak yazılabilir ve bir çok etki eden malzemenin özdirenci uzunluk ve alanı hesap edilerek bulunur.

Akım değişkenlik gösterebilir. Zaman olarak mikrosaniye cinsinden 20 ms ile 80 ms arası değişkenlik gösterebilir buna ilave olarak ön ısıtma uygulayarak sürenin uzaması meydana gelir.

E. ÇELİK HASIR KAYNAK DÜĞÜM NOKTASI ANALİZİ

TS4559 standartlarına göre uygun olarak hazırlanan numuneler kendi ekseni dogrultusunda dönem ve eğilme hareketi engellenecek şekilde boyuna çubuklara kuvvet uygulanarak çekme işlemi yapılırken en çubuklarından ise sabitlenerek kaynak düğüm noktası ayrılma kuvvetine bakılır.

TS4559 da belirtilmiş nervürlü çubukların düğüm noktasında kaynağın kopma dayanımı formulu şu şekilde verilmiştir.

Düğüm noktası mukavemeti $=0{,}30*A_s*f_{0,2}$ olarak TS4559 da formülize edilmiştir.

A_s düğüm noktası alanında kaynaklanmış nervürlü çubukların küçük çaplı nervürlü çubuk alanı

$f_{0,2}$ kullanılan nervürlü çubugun minimum akma sınırı 500 N/mm^2 kullanılır.

Düğüm noktası deneyi için en az 5 düğüm noktası kaynak kopması deneyi yapılmaktadır ve bu deneylerin sonucu formulize edilmiş sonucun 0,80 katından az olmamalıdır.

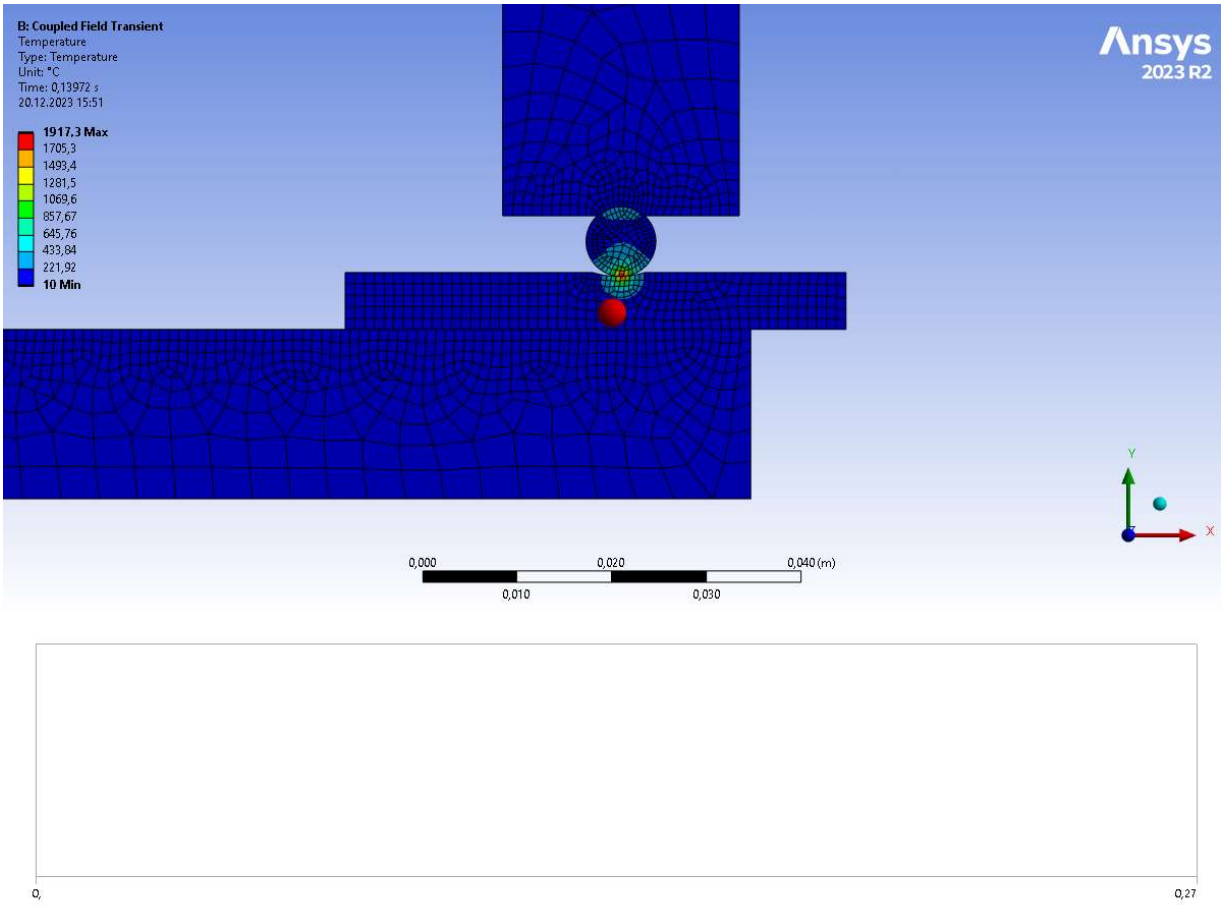
$0,30*A_s*f_{0,2}$ = düğüm noktası mukavemeti

$A_s = 6,5^2*(pi)/4 = 33,18\ mm^2$

$0,30*(33,18\ mm^2)*(500\ N/mm^2) = 4,977\ kN$

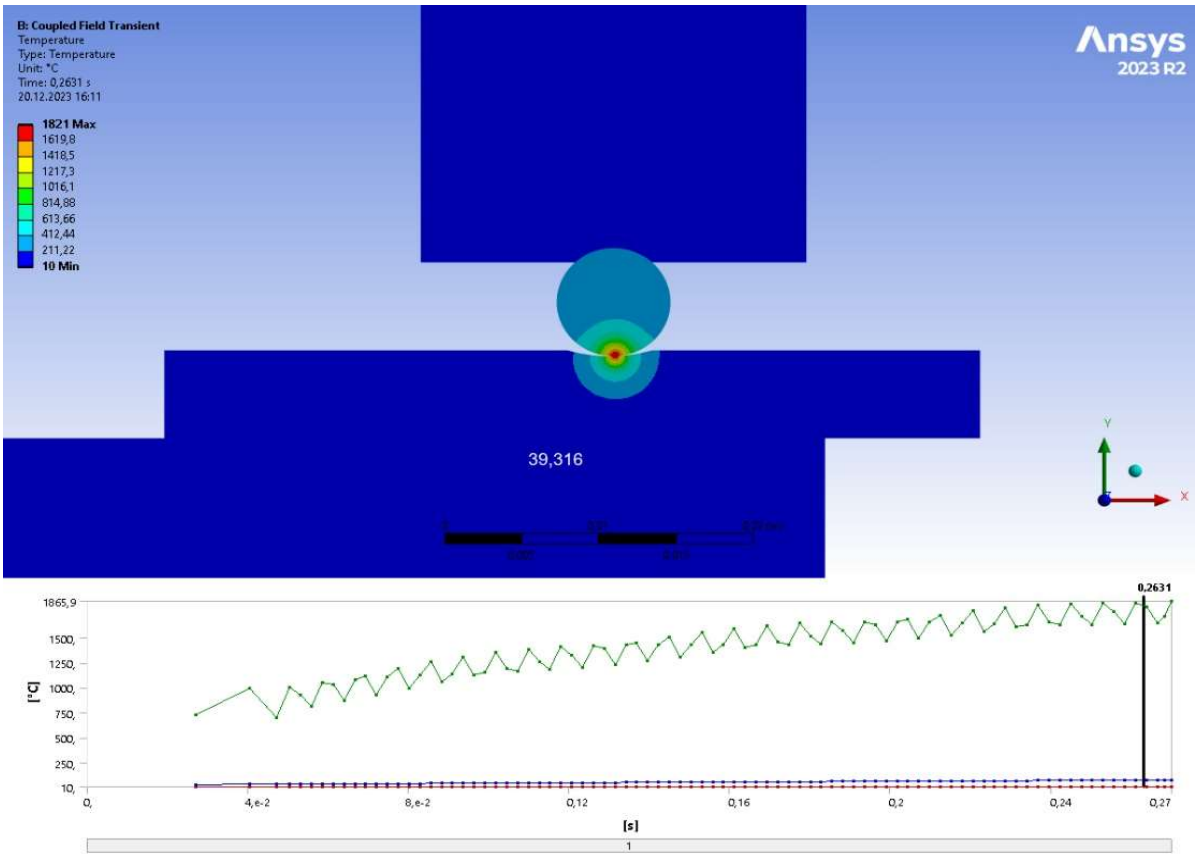
Bu değerin 0,80 katından küçük olamaz. 4,977 kN * 0,80 = 3,98 kN küçük olması uygun olmayacaktır.

Punto kaynak modellemesi yaparken çelik hasır elektrodları ve iş parçası nervürlü demir çubuklar birebir modellemesi yapıldıktan sonra ansys programında atandı. Bire bir modelleme yapılan elektrodlara ve nervürlü çubukların malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra çelik hasır kaynak makinası akım değerleri ve süreleri programa yükleme yapıldı. Daha sonra programda punto kaynak noktalarında oluşan ısı degerleri gözlemlendi. Şekil. 17'de gösterilen akım uygulanması sürecinde iş parçalarının birleşim noktalarında yüksek ısı oluşumu görülmektedir. Malzemenin yüksek ısı sonucu eriyik bölge oluşumu ve bununla birlikte basınç altında birleşimiyle neticelenmektedir.



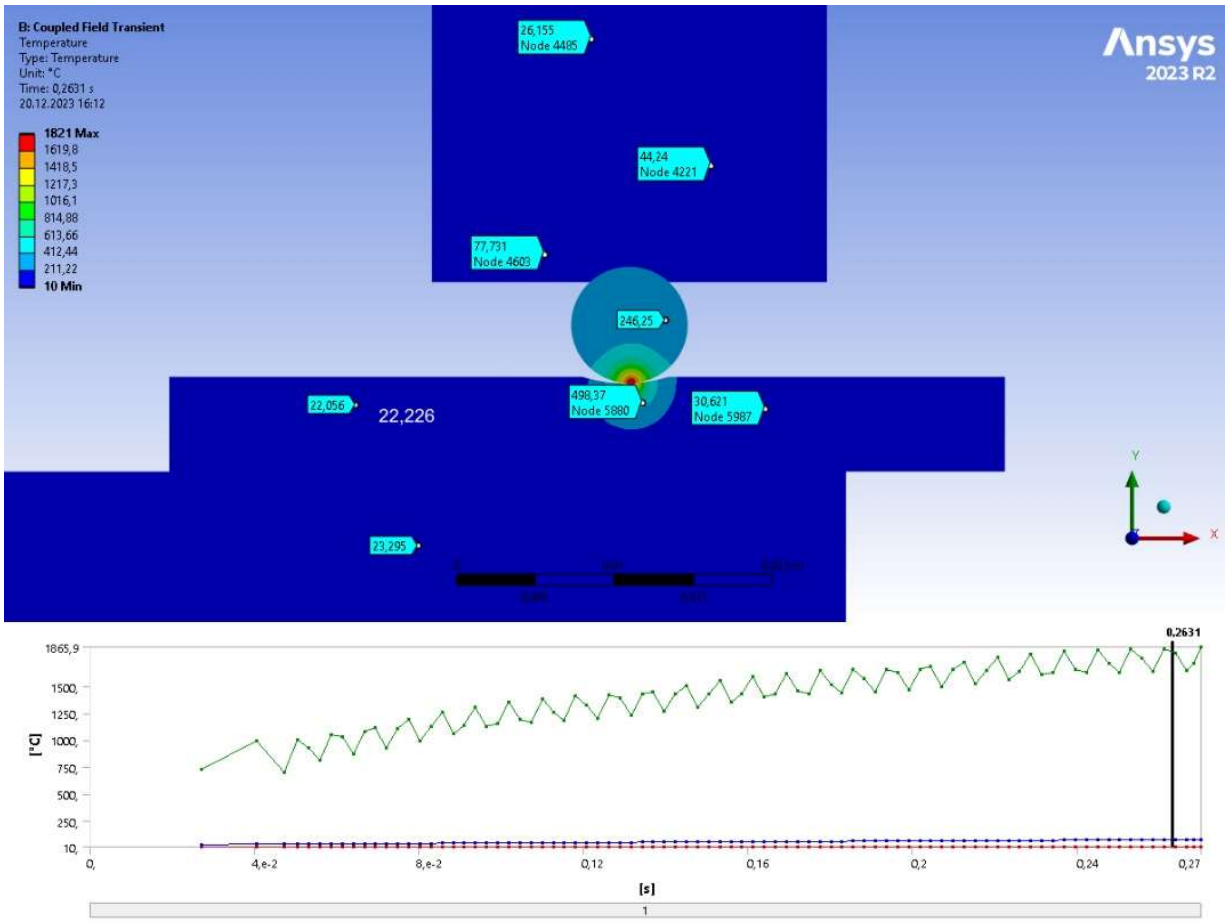
Şekil. 17 Birleşik kaynak geçişleri ile akım yüklemesi sonucu nervürlü demirlerde oluşan sıcaklık dağılımı ve meshlerde oluşan değişimi

Şekil. 17 'de görüldügü üzere basınç ve sıcaklık etkisiyle nervürlü demir çubukların punto kaynak bölgesi ve çevresi mesh haritasında bozulmalar meydana geldiği görülmektedir. Nervürlü çelik çubukların birleşimi esnasında mekanik bozulmalar da meydana geldiği görülmektedir. Punto kaynak noktasında maksimum seviyede olan sıcaklık dalgasının hızlı bir şekilde azalarak yayıldığı analiz sonucunda görülmektedir.



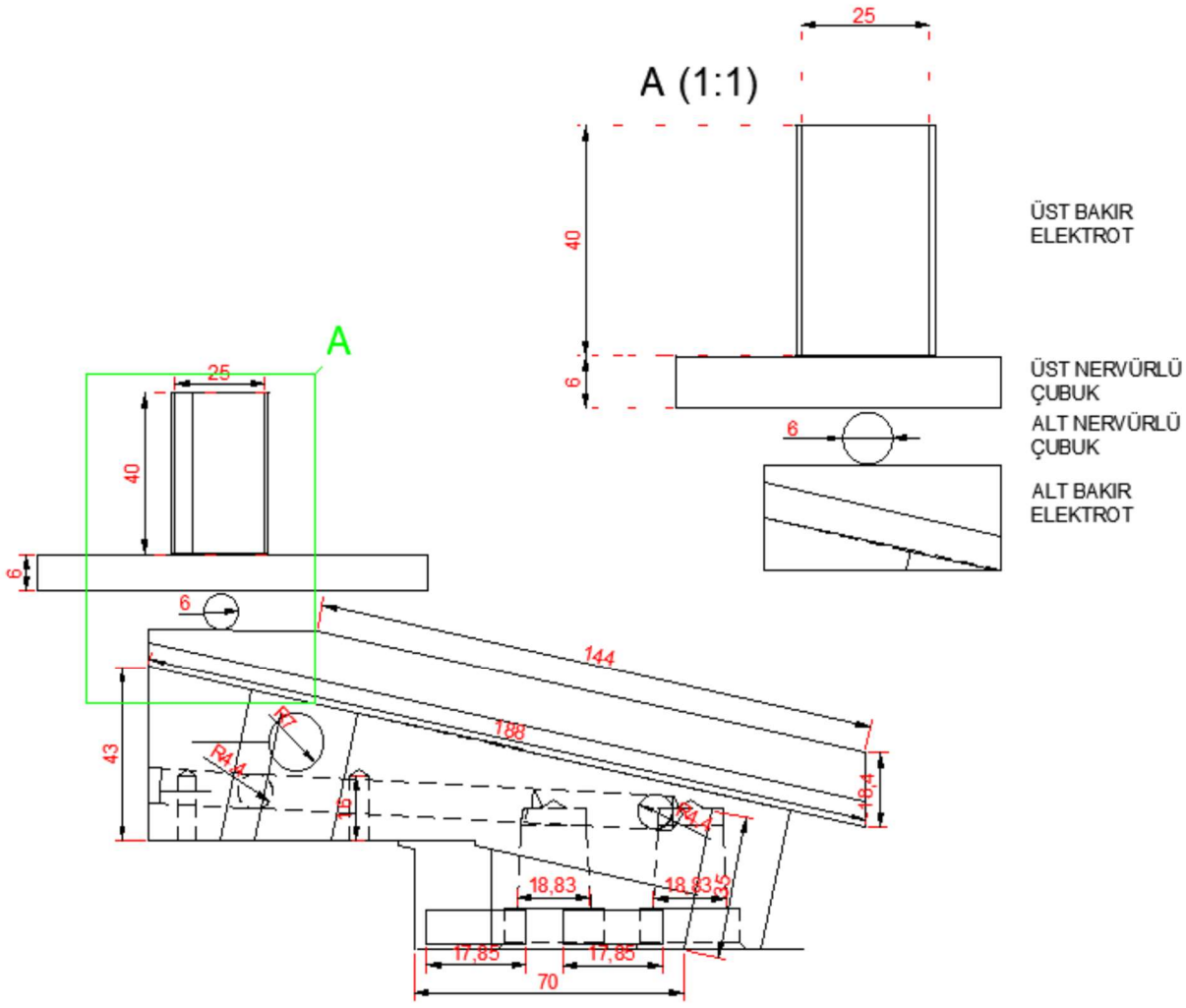
Şekil. 18 Punta kaynak esnasında sıcaklık dagılımı.

Analiz sonuclarına gözlemlendiğinde (şekil. 18) kaynak noktasının maksımum seviyede sıcaklıga sahip iken sıcaklık dalgasının hızla azaldığını bununda noktasal kaynak yapımında kaynak bölgesi harici yerlerin erime sıcaklıgının çok altında bir sıcaklık değerine sahip iken bölgesel kaynagın tamamlanarak yakın bölgeler dahi kaynaktan neredeyse etkilenmeden çıktığını göstermektedir.



Şekil. 19 Punta kaynağı esnasında belirli noktalardaki sıcaklıklar.

Analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil. 19) kaynak bölgesinde kaynak sıcaklığı 1821 °C olduğu, sıcaklığın nervürlü demirin kaynak bölgesinden yaklaşık 3 mm uzaklıkta 246 °C'ye düştüğü görülmüştür. Yaklaşık 4 cm uzaklıkta sıcaklıgın nervürlü demir üzerinde 22 °C'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bunun yanında kullanılan elektrodların kaynak sırasında sıcaklık ve deformasyona uğradığı da görülmektedir.



Şekil. 20 Alt ve üst elektrot birebir ölçü ve çizimi

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada 1008_00 kalite filmaşin kullanılarak, soğuk haddeleme ve nervürleme işlemleri gerçekleştirildi. Farklı çaplardaki filmaşinler mekanik analizlere tabi tutularak akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve süneklikleri belirlendi. Belirlenen özellikler doğrultusunda soğuk haddeleme işlemine tabi tutularak nervürlü çubuklar üretildi. Soğuk haddeleme ile üretilen nervürlü çubukların mekanik analizleri ve değerleri ölçülerek kayıt altına alındı. Aynı filmaşin kullanılarak farklı çaplardaki nervürlü çubukların mekanik analizleri karşılaştırıldı ve SPSS programı ile grafikleri incelendi. Sonuç olarak elde edilen görüşler aşağıda belirtilmiştir.

- Aynı çapta aynı kalite filmaşin kullanılarak farklı çaplarda elde edilen nervürlü çubukların deformasyon miktarı arttıkça akma mukavemeti ve çekme mukavemeti artmış olup süneklik miktarında ise azalma oldugu görülmüştür.
- %5,55 ve %7,14 deformasyon miktarı ile alınan sonuçların TS4559 standartlarına uygun olmadığı ve deformasyon miktarının %12,5 üzeri olduğu durumlarda ise TS4559 Standartlarına uygun sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- Kalın malzeme deformasyon miktarı daha az olsa da ince malzemeye kıyasla akma mukavemetinde ve çekme mukavemetinde daha fazla artış oldugu gözlenmiştir. Kalın malzemelerde daha az deformasyon ile daha yüksek sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

- Kaynak noktası punto kopması sonuçlarında kalınlık arttıkça kopma mukavemetinin arttıgı gözlenmiştir. Bu degerlerin TS4559 standartlarının çok üzerinde olduğu görülmüştür.
- Çelik hasır elektrodları ve iş parçası nervürlü demir çubuklar birebir modellemesi yapıldıktan sonra ansys programında kaynak sıcaklığının 1841 °C kadar yükseldiği görülmüştür.

IV. ÇIKARIM

Çelik hasır üretiminde soğuk haddeleme ile yapılan ve elde edilen nervürlü çubukların soğuk haddeleme deformasyon oranının önemli bir etki olduğu ve nihai ürünün çap gramaj ve ebatlama olarak sorun teşkil etmeyecek dahi olsada mekanik özellik yönünden çok mühim olduğu ve en az %10 deformasyon uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuc ile birlikte deformasyon miktarı arttıkça akma mukavemeti ve çekme mukavemetinin arttıgı bunun yanında ise sünekliğin azaldığı gözlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Her çalışmamda beni büyük bir özveri ve bilgi birikimiyle yönlendiren, araştırma sürecimdeki her adımda ilgi ve destek sunan kıymetli hocam Prof. Dr. Mustafa YAŞAR'a içtenlikle minnettarlığımı ifade etmek isterim. Sayın hocamın derin bilgi ve tecrübeleri, çalışmamın bilimsel temellerle güçlenmesine büyük katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

[1] Şahin, F., "Çok kademeli haddeleme prosesinin incelenmesi va analizi", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2021.
[2] Çarboğa, C., "Ç1010 Yapı çeliğinde soğuk çekme ile sağlanan deformasyonun malzemenin yorulma davranışına etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
[3] Altun, K., "Soğuk çekme metoduyla üretilen kaynak tellerinde görülen hataların belirlenmesi ve giderilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
[4] Özer, Ö., "Tel çekme işlemine etki eden faktörlerin mekanik ve teknolojik olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993.
[5] Dönmez, G., "Zincir çeliklerinin soğuk çekme oranına bağlı olarak deformasyon davranışlarının belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
[6] Çolak, B., "Soğuk haddelemede pürüzlülük transferini etkileyen haddeleme parametrenin ve malzeme özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi", Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018.
[7] Yılmaz, Y., "Soğuk çekme işleminde redüksiyon oranı ve ısıl işlemin çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2022.
[8] Başkaya, A., "Soğuk haddeleme işleminin proses amaçlı en iyilenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2020.
[9] Güzey, A., "Demirsel tellerin üretim sürecinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2009.
[10] Lin zhenlun, lin guozhen, liu xichuo "Bina inşaatında kaynaklı Çelik hasırın uygulanması" inşaat teknolojisi dergisi şubat 17, cilt 14, no 46
[11] İnternet: Çelik hasır kaynak imalatçısı uç kaynak makinası https://www.schlattergroup.com/en/welding-machines/wire-butt-welding-machines/#54-product
[12] Internet: soğuk haddeleme makina imalatçısı çekme makinaları genel görünümü https://www.demgroup.com/reinforcing-wire-rolling/#line-highlights
[13] Durdu, M., "Punta Kaynağı ve Perçin Bağlantılarının Mukavemetlerinin karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
[14] Açış, İ., "Punta Kaynak Keplerinin fe ve ni esaslı intermetaliklerle esd kullanılarak kaplanması", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2019.
[15] .TS4559 Beton Çelik Hasır Türk Standartları

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Betonarme Konut Binalarında Sismik İzolatör Kullanımının Yapı Güvenliği Açısından İncelenmesi

Ömer YALÇIN[a*], *Tuncay KAP*[b]

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu , İnşaat Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** omeryalcin271@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, sismik izolatör sistemlerinin deprem etkileri altında betonarme yapılar üzerindeki sonuçları araştırılmıştır. Dünyadaki ve ülkemizdeki uygulanan sismik izolatör sistemlerinin kullanımı deprem sonrasında yapının kullanımının aralıksız devam etmesi gereken sağlık, ulaşım, iletişim ve enerji vb. yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle özellikle konut yapılarında kullanımının önemini vurgulamak için izolatör sistemlerinin konut yapılarındaki kullanımının yapı güvenliği açısından etkileri araştırılmıştır. Ülkemizde deprem izolatörü kullanımı konut yapılarında çok azdır. Depreme karşı ciddi önemi olan deprem izolatör sitemleri konut yapılarında daha çok kullanılması ve yapı güveliğini daha üst seviyelere çıkarmak amaçlanmıştır. Çalışmamızda Türkiye'de deprem riski yüksek şehirler için sismik izolatörün apartman yapıları için avantaj veya dezavantajları değerlendirilecektir. Yapılan çalışmada Sta4Cad programı kullanılarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY2018) göre ve 1. Derece deprem bölgesinde bulunan betonarme bir yapının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Çalışmada paket programda sırasıyla 6,8,10,12,14 katlarda oluşturulan izolatörlü bina modeli tasarlanıp deprem yükü açısından incelenmiştir. TBDY 2018 yönetmeliği 14.bölümde belirtilen genel tasarım ilkeleri göz önünde bulundurularak oluşturulan sismik izolasyonlu tasarımda yapıya etkiyen deprem yükü değeri her yapı modeli için katlar arasındaki maksimum değer göz önünde bulundurulmuştur. 6 katlı tasarımda katlar arasındaki oluşan maksimum deprem yükü 57.913 ton, 8 katlı tasarımda 48.804 ton, 10 katlı tasarımda 44.399 ton, 12 katlı tasarımda 39.804 ton, 14 katlı tasarımda ise deprem kuvveti yükü 36.634 ton olarak belirlenmiştir. Kat sayısı arttıkça izolatörlü yapı modelimizde deprem yükleri azalmakta olduğu görülmüştür. Yapının daha az deprem etkisine maruz kalması İzolatör kullanımının yapı ve insan güvenliği açısından ciddi olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Konut Yapıları, Sismik İzolatör Sistemleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Yapı Güvenliği*

Examination of the Use of Seismic Isolators in Reinforced Concrete Residential Buildings in Terms of Structural Safety

ABSTRACT

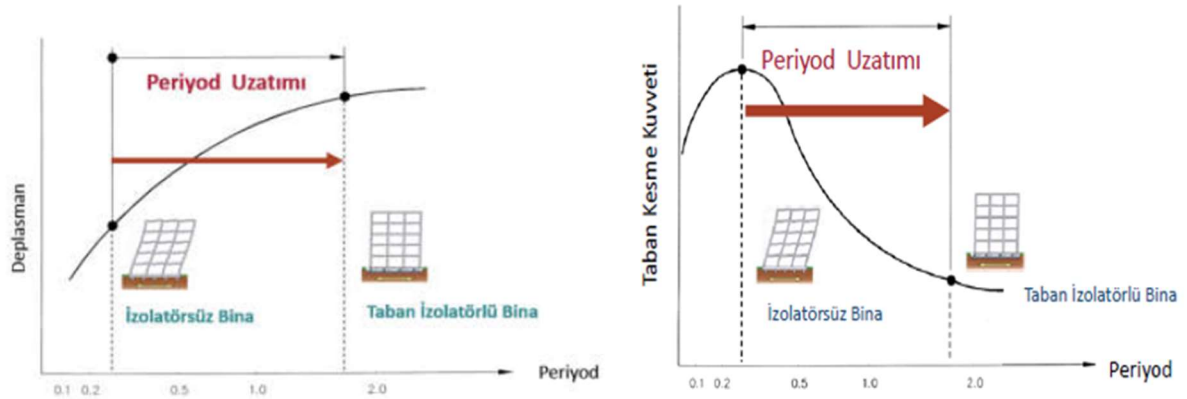
In this study, the results of seismic isolator systems on reinforced concrete structures under earthquake effects were investigated. The use of seismic isolator systems applied in the world and in our country is necessary for health, transportation, communication and energy, etc., where the use of the building must continue uninterrupted after the earthquake. It is widely used in buildings. For this reason, in order to emphasize the importance of their use in residential buildings, the effects of the use of insulator systems in residential buildings in terms of building safety were investigated. In our country, the use of earthquake isolators in residential buildings is very low. Earthquake isolator systems, which have serious importance against earthquakes, are intended to be used more in residential buildings and to increase building safety to higher levels. In our study, the advantages and disadvantages of seismic isolators for apartment buildings

in cities with high earthquake risk in Turkey will be evaluated. In the study, a comparative analysis of a reinforced concrete building located in the 1st Degree earthquake zone was made according to the Turkish Building Earthquake Regulation (TBDY2018) using the Sta4Cad program. In the study, a building model with isolators created in the package program on 6,8,10,12,14 floors was designed and examined in terms of earthquake load. In the seismic isolated design, which was created by taking into account the general design principles specified in section 14 of the TBDY 2018 regulation, the earthquake load value acting on the structure was taken into account, the maximum value between floors for each building model. The maximum earthquake load between floors in a 6-storey design is determined as 57,913 tons, in a 8-storey design it is 48,804 tons, in a 10-storey design it is 44,399 tons, in a 12-storey design it is 39,804 tons, and in a 14-storey design it is determined as 36,634 tons. It has been observed that as the number of floors increases, earthquake loads decrease as a result of the isolator design. The structure is less exposed to earthquake effects. It has been observed that the use of insulators gives serious positive results in terms of structure and human safety.

Keywords: *Residential Buildings, Seismic Isolator Systems, Turkish Building Earthquake Regulation, Building Safety*

I. GİRİŞ

Deprem ve rüzgâr gibi yatay yüklerden dolayı yapılarda meydana gelebilecek hasarların etkisini kontrol altında tutmak, yapı ve deprem mühendisliğinin en önemli amaçlarından biridir. Türkiye ve dünya da nüfus yoğunluğunun büyük oranda artması sonucu yüksek katlı yapılar inşa edilmektedir. Bu yapılar deprem riski açısından büyük risk barındıran yapılar olmaktadır. Yüzyıllar boyunca yapılan yapılar ciddi depremlerde sürekli ağır hasarlar almış ve ciddi ölümlere yol açmıştır. Günümüzde özellikle sismik izolatörler sistemlerinin yapılarda dış yük etkilerine karşı enerji sönümleyici görevi üstlenmesi, yapılar için önemli bir yapısal elemana dönüşmüştür [1][2]. Deprem izolatörlerin birçok örnekleri mevcuttur. Sismik izolatörler günümüze kadar genel olarak sağlık, ulaşım, iletişim ve enerji yapılarından kullanılmıştır. Yani izolatör kullanılacak yapının deprem sonrasında işlevine devam etmesi gereken yapılar için kullanılmıştır. Sismik izolasyonların asıl görevi deprem yüklerini minimum seviyelere çekerek yapıdaki hasar ve can kaybını en aza indirmektir [3]. İzolatörler yapı yapım aşamasında kullanılmasından öte eski binaların güçlendirilmesi içinde kullanılmaktadır. Ülkemizde de daha çok bina önem katsayısı 1.5 olan yapıların güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Son yıllarda daha çok hastane, viyadük, hava alanları gibi yapılarda kullanımı artmıştır. Hastane yapıları için yayınlanan genelgede izolatörler zorunlu hala getirilmiştir[4][5]. Ülkemizdeki apartman konut yapılarında ise sismik yapısal elemanlar için herhangi bir genelge veya zorunluluk bulunmamaktadır. Şekil 1'de sismik izolasyonlu bir yapının deprem yüklerine karşı periyod etkisinin durumları görülmektedir [4].



Şekil 1. Sismik izolasyon Kavramı a) Yapının rijitliğinin azaltılması periyodunu uzatıp deprem yükünü azaltacaktır ve b) periyodun uzaması depremi sönümlerken izolatörlerde deplasmanı arttıracaktır.

Ankastre mesnetli yapıda deprem nedeniyle ortaya çıkan enerji, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanları tarafından sönümlenmektedir. Bu durumda taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanları hasar görebilmektedir. Sismik izolasyonlu yapıda ise yapı salınım periyodunun artmasıyla birlikte depremden dolayı yapıya etkiyecek olan ivme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Periyodun artması ile yapının izolasyon seviyesinde yer değiştirme talebi de artmaktadır. Yer değiştirme talebini karşılayabilmek için

izolasyon sisteminin yeterli sönüme sahip olması gerekmektedir [6][7]. Bu sebeple bu sönüm izolatör seviyesinde oluşacağı için üst yapıda deprem etkisi minimum seviyelerde olacaktır.

Ülkemizde izolatörlerin kullanım alanları yukarıda da belirtilmiş olup kullanımı daha az derecelerde olan konut binalarındaki etkilerini incelemek ve daha güvenli yapılar inşa edebilmek için bir çalışma yapmaktayız. Bunun yanında bu tür sağlık, ulaşım vb. önem katsayısı yüksek yapılarda kullanılmasının ötesinde konut yapılarının da deprem sonrasında kullanılır halde olması gerekmektedir. Konut yapılarında kullanılacak sismik izolatör sistemlerinin yapı üzerindeki emniyet, ekonomik ve estetik kavramları araştırılacaktır. Sismik izolatör sistemleri ve deprem yönetmeliğinde belirtilen şartlar ile bir model tasarımı yapılıp sonucundaki etkilerine bakılacaktır [8][9].

Bu neticeler dahilinde yapıların depreme karşı daha güvenli, daha konforlu olmasını hedeflemekteyiz. Yapılacak olan çalışmamızda, sismik izolasyonların deprem esnasında betonarme konut yapılarına karşı olumlu veya olumsuz etkileri araştırılacaktır. Bu bildirimizde Türkiye'de deprem riski yüksek şehirler için sismik izolatörün konut yapıları için avantaj veya dezavantajları değerlendirilecektir. Yapılan çalışmada özellikle paket programlar kullanılarak 1.derece deprem bölgelerindeki büyük depremler göz önünde bulundurularak izolatörlü konut yapısı yapı güvenliği açısından binada oluşacak deprem yükü değerlendirilecektir. Sonuç olarak bu netice ışığında bizim yapacağımız çalışma daha çok 1. Derece deprem bölgelerinde konut yapılarının daha konforlu, daha güvenli bir şekilde tasarlanması için sistemin işleyişi ve etkilerini her açıdan değerlendirmek olacaktır[10]. Sismik izoaltörlü yapı sistemlerinde yapı salınım periyodu uzatılarak yapıya etkiyecek olan ivmeler dolayısıyla kesme kuvvetleri ve göreli kat ötelemelerinin azaldığı görülmektedir. Yapılacak çalışmada farklı katlar için ayrı ayrı izolatörlü yapı tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada farklı katlar için izolatör kullanımının deprem yükü açısından etkileri incelenecektir. Yapımızın analiz sonuçları değerlendirilecektir. İzolatörlü farklı katlar için oluşturduğumuz modeli ve analizleri yapılmış konut yapımızda kullandığımız sismik izolatörlerin deprem yüklerine karşı vermiş olduğu etkilerine bakılarak deprem sonrasındaki yapı güvenliği ve deprem yükü etki durumu incelenecektir [11].

II. MATERYAL METOT

Yapılan çalışmada genel olarak 1.derece deprem bölgelerindeki ortalama betonarme konut yapısının 6,8,10,12,14 katlı sismik izolasyonlu bina modelleri araştırılacaktır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ışığında deprem yükü kuvvetlerine karşı davranışları incelenecektir. Konut bina modelimiz kiriş-kolon çerçeve sistemli yapı modeli olacaktır. Yapı, 2018 deprem yönetmeliğinin 17. bölüm şartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Bu yapı modeli sta4Cad paket programı kullanılarak izolatörün deprem kuvvetleri üzerindeki etkisi incelenecektir. Sismik İzolatörlü konut yapısı modelinde Zemin sınıfı olarak zemin etüdü yapılmış deprem bölgesi verileri kullanılarak ZC sınıflı zemin parametreleri kullanılacaktır. Konut yapımızın temel sistemi radye temel olarak belirlenmiştir. Yapılacak çalışmada izolatörlü yapı model analizindeki deprem yükü değerleri değerlendirilecektir. Tüm bina modellerinde C25-30 beton sınıfı ve S-420C çelik kullanılmıştır. Binadaki çatı yükü 1,5 kN/m2, hareketli yük ise 2 kN/m2 olarak alınmıştır. Planda binaların aks aralıkları en büyük açıklık 7 m, en küçük açıklık ise 4 m olarak seçilmiştir. "x" ve "y" yönlerinde eksen sayıları eşit olup, 5 eksen bulunmaktadır ve bir kattaki kolon sayısı 25 adet olarak belirlenmiştir. Binanın zemin kat yüksekliği 4 m olup, diğer katlar 3m olarak projelendirilmiştir. Yapı modelinde karşılaştırması yapılacak kat sayıları sırasıyla 6,8,10,12,14 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma için kolon boyutları izolatör katında 100x100, diğer katlarda ise 40x40 cm olarak tasarlanmıştır. İnşa edilen bina modellerinin uzun kenarı 22 m, kısa kenarı ise 20 m'dir. İzolatör tipi olarak kurşun çekirdekli kauçuk sismik izolatör kullanılmıştır. Bina tasarım modelinde izolatör için gerekli deneylerin yapıldığı varsayılarak maksimum deplasman değeri 35cm belirlenmiştir. Kauçuk sismik izolatör (GZP-600) yani 60 cm çapında, 19,7 cm yüksekliğinde kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılarak yapılan analizlerde tasarım deplasmanı 11.2cm olarak belirlenmiştir. Kurşun çekirdek sönümlemesi ise 8 cm olarak belirlenmiştir. Binada bulunan tüm kolon sayısı kadar izolatör kullanılmıştır. Deprem etkisi altındaki binalar 2018 deprem yönetmeliğine uygun olarak STA4 V14.1 programıyla analiz edilmiştir [12]. İnşa edilen altı katlı bina modellerinin plan örnekleri ve 3 boyutlu görünümleri gösterilmektedir (Şekil 1).

İzolatörlü Binanın Tasarımı

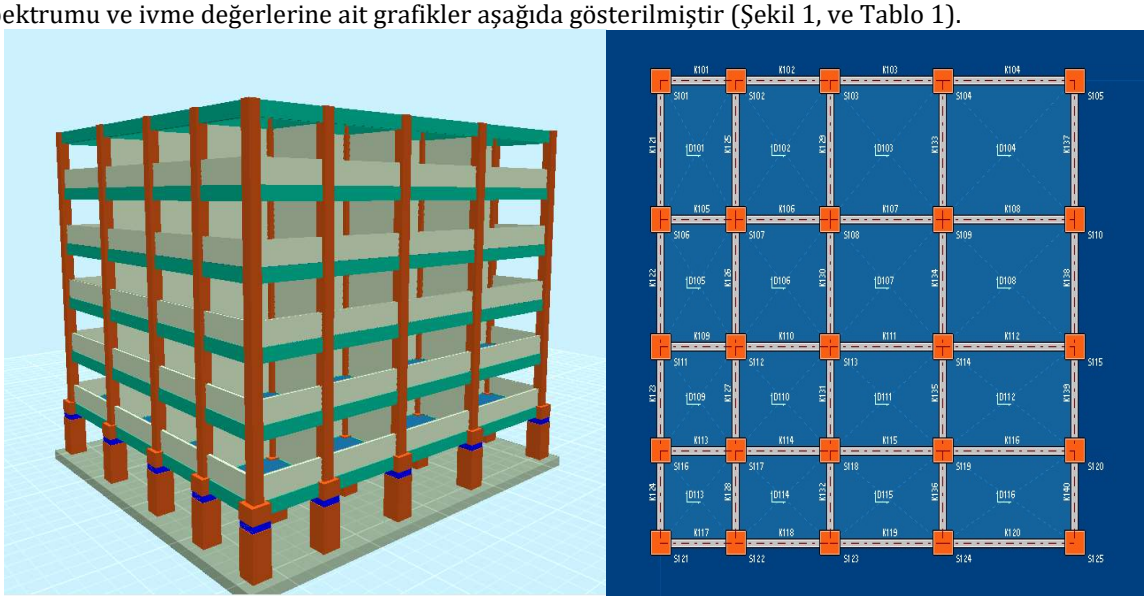
Tasarlanan binada 3 boyutlu kurşun sönümleyici sismik izolatör kullanılmıştır.

Tablo 1. GZP 600 İzalatör teknik özellikleri

İzalatör ismi	GZP600
Kx (t/m)	157
Ky (t/m)	157
Kz (t/m)	169000
Sönüm oranı	0.05
Maksimum deplasman (cm)	60
Yükseklik (cm)	19,7
Kurşun Sönümleyici (cm)	8

6. Katlı İzolatörlü Binanın Analizi

6 katlı izolatörlü betonarme bina modelinin dinamik analizi sonucunda yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu ve ivme değerlerine ait grafikler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1, ve Tablo 1).



Şekil 1. Tasarlanan 6 katlı bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünümü

DEPREM KUVVETİ (t)

Deprem tepe yükü Ftx= 23.81 Fty= 23.90 (t)

Tablo 2. X ve Y Doğrultusu Eşdeğer deprem yöntemi ile deprem yükü

	X Yönü			Y Yönü		
Katlar	Modal Analiz	Eş değer Deprem Yöntemi	Deprem Yükü	Modal Analiz	Eş değer Deprem Yöntemi	Deprem Yükü
6	45,294	45,294	45,294	45,183	45,183	45,183
5	55,973	55,973	55,973	55,955	55,955	55,955
4	51,584	51,584	51,584	51,701	51,701	51,701
3	47,459	47,459	47,459	47,679	47,679	47,679
2	44.686	44.686	44.686	44,958	44,958	44,958
1	57,620	57,620	57,620	57,913	57,913	57,913
Σ	302,615	302,615	302,615	303,389	303,389	303,389

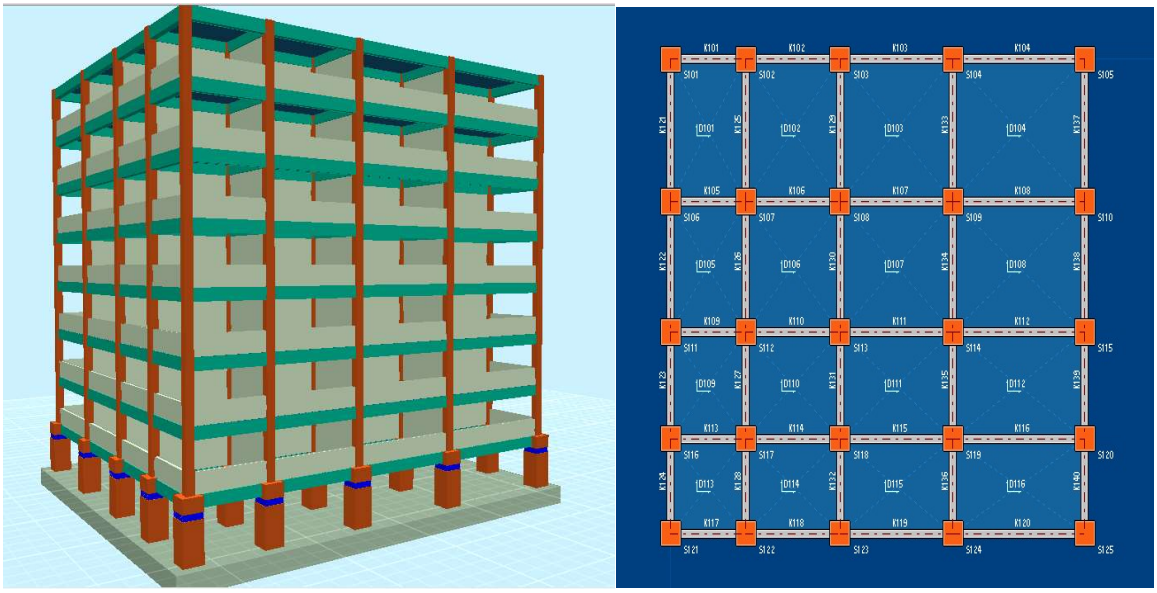
Vtx= 302.62 > 0.04.I.Sds.W = 171.06 TBDY2018 4.7.1.1 Vty= 303.39 > 0.04.I.Sds.W = 171.06

X Deprem kontrol: 0.80 × 302.615 = 242.092 < 302.615 >>> 302.615

Y Deprem kontrol: 0.80 × 303.389 = 242.711 < 303.389 >>> 303.389

8. Katlı İzalatörlü Binanın Analizi

8 katlı izalatörlü betonarme bina modelinin dinamik analizi sonucunda yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu ve ivme değerlerine ait grafikler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2, ve Tablo 3).



Şekil 2. Tasarlanan 8 katlı bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünümü

DEPREM KUVVETİ (t)

Deprem tepe yükü Ftx= 35,04 Fty= 35,20 (t)

Tablo 3. X ve Y Doğrultusu Eşdeğer deprem yöntemi ile 8. Katlı bina deprem yükü

	X Yönü			Y Yönü		
Katlar	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**
8	39,315	39,315	39,315	39,214	39,214	39,214
7	48,823	48,823	48,823	48,804	48,804	48,804
6	45,381	45,381	45,381	45,480	45,480	45,480
5	42,002	42,002	42,002	42,175	42,175	42,175
4	39,080	39,080	39,080	39,296	39,296	39,296
3	36,674	36,674	36,674	36,931	36,931	36,931
2	35,208	35,208	35,208	35,489	35,489	35,489
1	46,716	46,716	46,716	46,978	46,978	46,978
Σ	333,199	333,199	333,199	334,368	334,368	334,368

Vtx= 333,20 > 0.04.I.Sds.W = 227,49 TBDY2018 4.7.1.1

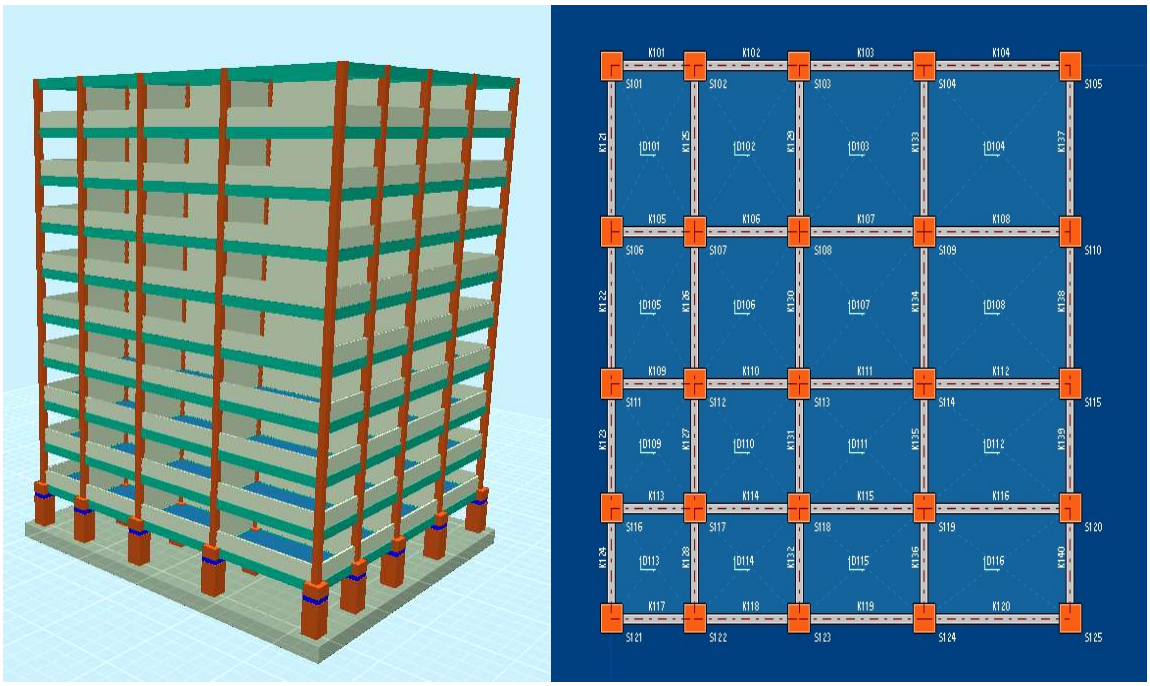
Vty=334,37 > 0.04.I.Sds.W = 227,49

X Deprem kontrol: 0.80 × 333,199 = 266,559 < 333,199

Y Deprem kontrol: 0.80 × 334,368 = 267,494 < 334,368

10. Katlı İzalatörlü Binanın Analizi

10 katlı izalatörlü betonarme bina modelinin dinamik analizi sonucunda yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu ve ivme değerlerine ait grafikler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3, ve Tablo 3).



Şekil 3. Tasarlanan 10 katlı bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünümü

DEPREM KUVVETİ (t)
Deprem tepe yükü Ftx= 46,69 Fty= 46,94 (t)

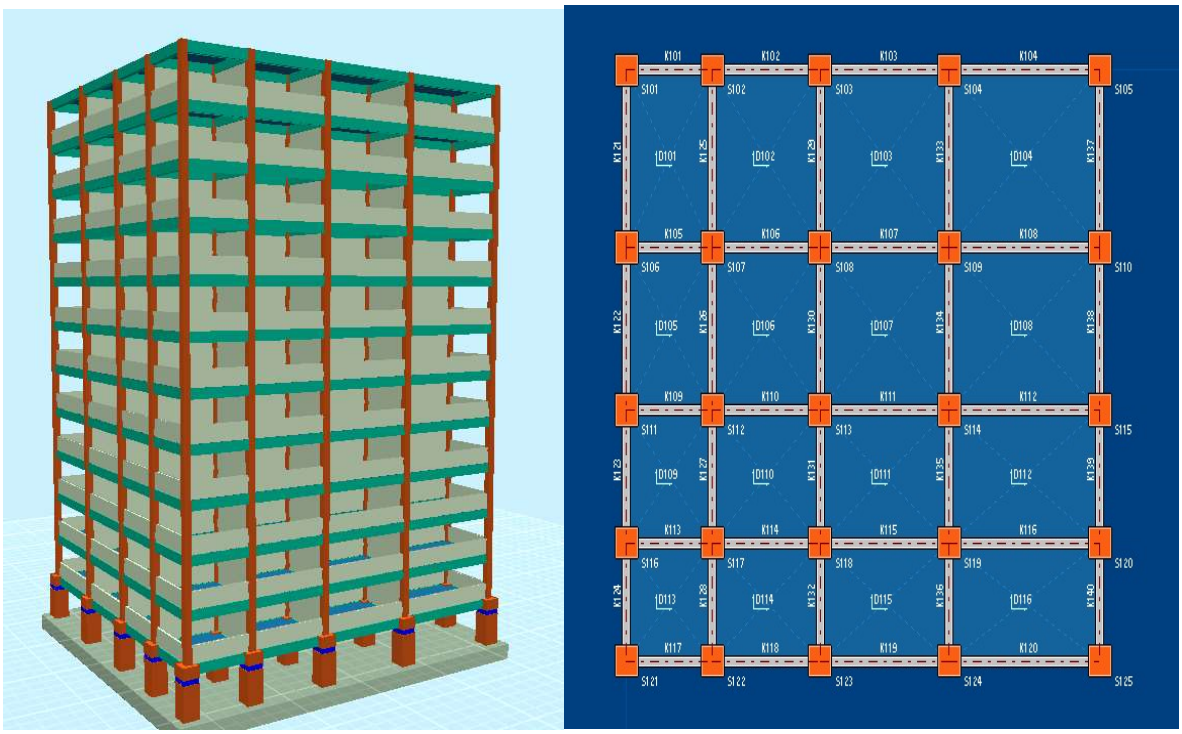
Tablo 4. X ve Y Doğrultusu Eşdeğer deprem yöntemi ile 10. Katlı bina deprem yükü

	X Yönü			Y Yönü		
Katlar	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**
10	28,784	28,784	28,784	28,717	28,717	28,717
9	44,427	44,427	44,427	44,399	44,399	44,399
8	41,546	41,546	41,546	41,615	41,615	41,615
7	38,539	38,539	38,539	38,684	38,684	38,684
6	35,897	35,897	35,897	36,090	36,090	36,090
5	33,672	33,672	33,672	33,893	33,893	33,893
4	31,774	31,774	31,774	32,013	32,013	32,013
3	30,254	30,254	30,254	30,504	30,504	30,504
2	29,558	29,558	29,558	29,805	29,805	29,805
1	40,200	40,200	40,200	40,418	40,418	40,418
Σ	354,651	354,651	354,651	356,140	356,140	356,140

Vtx= 354,65 > 0.04.I.Sds.W = 279,83 TBDY2018 4.7.1.1
Vty=356,14 > 0.04.I.Sds.W = 279,83
X Deprem kontrol: 0.80 × 354,651 = 283,721 < 354,651
Y Deprem kontrol: 0.80 × 356,140 = 284,912 < 356,140

12. Katlı İzalatörlü Binanın Analizi

12 katlı izalatörlü betonarme bina modelinin dinamik analizi sonucunda yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu ve ivme değerlerine ait grafikler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4, ve Tablo 4).



Şekil 4. Tasarlanan 12 katlı bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünümü

DEPREM KUVVETİ (t)
Deprem tepe yükü Ftx= 59,11 Fty= 59,47 (t)

Tablo 5. X ve Y Doğrultusu Eşdeğer deprem yöntemi ile 12. Katlı bina deprem yükü

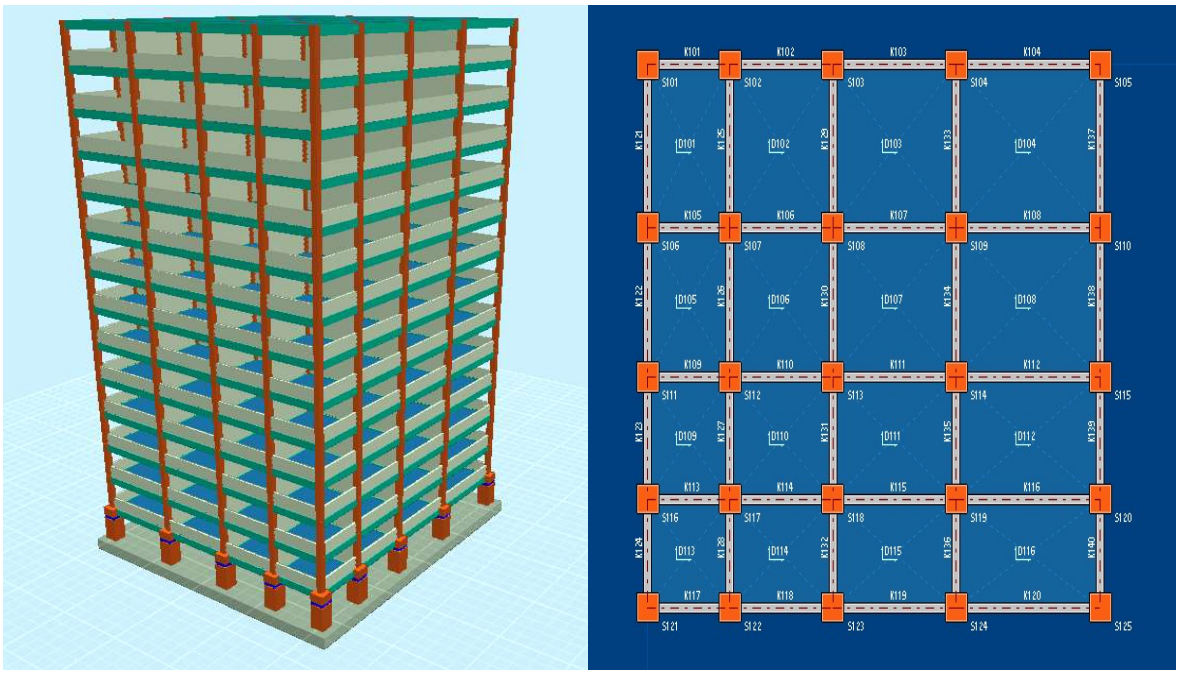
	X Yönü			Y Yönü		
Katlar	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**
12	31,898	31,898	31,898	31,840	31,840	31,840
11	39,810	39,810	39,810	39,804	39,804	39,804
10	37,282	37,282	37,282	37,360	37,360	37,360
9	34,679	34,679	34,679	34,815	34,815	34,815
8	32,232	32,232	32,232	32,502	32,502	32,502
7	30,308	30,308	30,308	30,502	30,502	30,502
6	28,615	28,615	28,615	28,826	28,826	28,826
5	27,242	27,242	27,242	27,459	27,459	27,459
4	26,133	26,133	26,133	26,348	26,348	26,348
3	25,305	25,305	25,305	25,523	25,523	25,523
2	25,153	25,153	25,153	25,366	25,366	25,366
1	35,027	35,027	35,027	35,196	35,196	35,196
Σ	373,785	373,785	373,785	375,542	375,542	375,542

Vtx= 373,78 > 0.04.I.Sds.W =340,35 TBDY2018 4.7.1.1

Vty=375,54 > 0.04.I.Sds.W = 340,35
X Deprem kontrol: 0.80 × 373,785 = 299,028 < 373,785
Y Deprem kontrol: 0.80 × 375,542 = 300,434 < 375,542

14. katlı izalatörlü binanın analizi

14 katlı izalatörlü betonarme bina modelinin dinamik analizi sonucunda yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu ve ivme değerlerine ait grafikler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5, ve Tablo 5).



Şekil 5. Tasarlanan 12 katlı bina modelinin basit planı ve 3 boyutlu görünümü

DEPREM KUVVETİ (t)
Deprem tepe yükü Ftx= 71,58 Fty= 72,05 (t)

Tablo 6. X ve Y Doğrultusu Eşdeğer deprem yöntemi ile 14. Katlı bina deprem yükü

	X Yönü			Y Yönü		
Katlar	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**	**Modal Analiz**	**Eş değer Deprem Yöntemi**	**Deprem Yükü**
14	29,846	29,846	29,846	29,811	29,811	29,811
13	36,627	36,627	36,627	36,634	36,634	36,634
12	34,382	34,382	34,382	34,457	34,457	34,457
11	32,044	32,044	32,044	32,169	32,169	32,169
10	29,404	29,404	29,404	30,055	30,055	30,055
9	28,024	28,024	28,024	28,191	28,191	28,191
8	26,405	26,405	26,405	26,583	26,583	26,583
7	25,057	25,057	25,057	25,243	25,243	25,243
6	23,983	23,983	23,983	24,174	24,174	24,174
5	23,152	23,152	23,152	23,344	23,344	23,344
4	22,500	22,500	22,500	22,689	22,689	22,689
3	22,065	22,065	22,065	22,253	22,253	22,253
2	22,250	22,250	22,250	22,427	22,427	22,427
1	31,606	31,606	31,606	31,736	31,736	31,736
Σ	387,845	387,845	387,845	389,768	389,768	389,768

Vtx= 387,84 > 0.04.I.Sds.W =397,18 TBDY2018 4.7.1.1

Vty=389,77 > 0.04.I.Sds.W = 397,18
X Deprem kontrol: 0.80 × 387,845 = 310,276 < 387,845
Y Deprem kontrol: 0.80 × 389,768 = 311,814 < 389,768

III. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada 1. derece deprem bölgelerindeki ortalama betonarme konut yapısının 6,8,10,12,14 katlı sismik izolasyonlu bina modelleri tasarlanmıştır. Konut bina modelimiz kiriş-kolon çerçeve sistemli yapı modeli olarak modellenmiştir. Yapı modelleri, 2018 Deprem yönetmeliğinin 14. bölüm şartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ışığında deprem yükü kuvvetlerine karşı davranışları incelenmiştir.

- 6 katlı izolatörlü bina modeli referans alındığında 1. Kat için 57,913 t, 6. Kat için 45,183 t ve ortalama 50,564-ton deprem kuveti oluşmaktadır.

- 8 katlı izolatörlü bina modeli referans alındığında . Kat için 46,978 t, 8. Kat için39,214t ve ortalama 41,796-ton deprem kuveti oluşmaktadır.

- 10 katlı izolatörlü bina modeli referans alındığında 1. Kat için 40,418 t, 10. Kat için 28,717 t ve ortalama 35,614-ton deprem kuveti oluşmaktadır.

- 12 katlı izolatörlü bina modeli referans alındığında 1. Kat için 35,196 t, 12. Kat için 31,840 t ve ortalama 31,295-ton deprem kuveti oluşmaktadır.

- 14 katlı izolatörlü bina modeli referans alındığında 1. Kat için 31,736 t, 14. Kat için 29,811 t ve ortalama 27,840-ton deprem kuveti oluşmaktadır.

- 6 katlı izolatörlü bina modeli için deprem yükü sonuçları değerlendirdiğimizde 1.kat ile 6.kat arasında %28 oranında azalmaktadır.

- 8 katlı izolatörlü bina modeli için deprem yükü sonuçları değerlendirdiğimizde 1.kat ile 8.kat arasında %20 oranında azalmaktadır.

- 10 katlı izolatörlü bina modeli için deprem yükü sonuçları değerlendirdiğimizde 1.kat ile 10.kat arasında %40 oranında azalmaktadır.

- 12 katlı izolatörlü bina modeli için deprem yükü sonuçları değerlendirdiğimizde 1.kat ile 12.kat arasında %11 oranında azalmaktadır.

- 14 katlı izolatörlü bina modeli için deprem yükü sonuçları değerlendirdiğimizde 1.kat ile 14.kat arasında %7 oranında azalmaktadır.

Bu çalışmamızda, özellikle deprem bölgelerinde yapılması düşünülen betonarme yapıların izolatör kullanımının 6,8,10,12,14 katları için model tasarımı yapılan binalar için yatay deprem yüklerine karşı etkileri incelenmiştir. Bu neticede tasarladığımız deprem izolasyonlu bina modellerimizin farklı katlardaki deprem kuvveti etkileri farklılık göstermiştir. Yapılan analiz tasarımlar ışığında deprem izolatörü kullanımı belli katlarda daha anlamlı daha uygun sonuçlar vermiştir. Özellikle 60x60 kare kolonlarla tasarladığımız bina modelimizde 10 katlı bina modeli %40 katlar arası değişim ile en anlamlı sonucu vermiştir.

Yapılan çalışmada 10 kat ve altındaki katardaki modellerin daha olumlu ve daha güvenli olacağı sonucuna varılmıştır. Tabi yapının oturacağı Zemin değerleri, fay hattı ve modele göre değişiklik göstereceği göz önünde tutularak bu çalışma ışığında 10 katın üzerindeki katlarda deprem izolatörünün kullanımı çok olumlu sonuçlar vermemektedir. Çalışmanın ışığında bu tür kare kolon kesitli ve izolatörlü yapı modellerinde 10 katlı olarak tasarlanılması daha uygun sonuçlar vereceği düşünülmektedir.Özellikle ülkemizde izolatör kullanımı bu tür olumlu ve doğru sonuçların alınacağı katlar için zorunlu hale getirilmesi düşünülmektedir.

IV. TARTIŞMA

Ülkemizdeki yapıların büyük bir çoğunluğu deprem kuşağında yer alması nedeniyle bundan sonra yapılacak yapılarda izalatör kullanımının ciddi bir şekilde planlanması gerektiği düşünülmektedir. Bu

nedenle deprem sonrası yapıların tekrar hasar almadan veya düzeyde min.düzeyde hasarlar alarak depremi atlatacağı ve yapı güvenliği açısından oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Yeni yapılacak yapılarda izalatör kullanımının teşvik edilmesi ve yapısal çözümlemelerde zorunlu olarak kullanımı sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] M.H. Severcan and P. Şen. "The effect of the number of story on seısmıc ısolated buıldıngs "ÖHÜ Engineering Science Journal, 8(2), 922-935, 2019.

[2] A. Kuşu and K. Beyen. "Comparison of 12-Storey Steel and Reinforced Concrete Structures under the Same Conditions According to the Principles of TBDY 2018"Kocaeli University Journal of Science, 2(2), 64-73, 2019.

[3] A. Özmen, B. Şadan, J. Kubin, D. Kubin, S. Akkar, O. Yücel, H. Aydın and E. Eroğlu. "Türkiye Earthquake ınsulated hospıtal desıgn applıcatıon: Erzurum health campus " Earthquake Engineering and Seismology Conference, 2011.

[4] B.Şadan. "Earthquake isolation application in residences " webinar , 2020.

[5] A.H. Deringül and E.M. Güneyisi. "Effect of lead rubber bearing on seismic response of regular and irregular frames in elevation "Pamukkale University Engineering Science Journal, 26(6), 1076-1085, 2020.

[6] S. Yıldırım, M.D. Güler, C. Özer, F. Sütçü, C. Alhan and B. Erkuş. "Earthquake desıgn of damped structures, part ı: revıew of ınternatıonal regulatıons "5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), 2019.

[7] Ö. Kan, K. Kaymaz, B. Zengin and M. Özcan. "Investigation of Seismic Isolation Types of Earthquake Resistant Structures in Turkey " 5(1), 2148-0273, 2017.

[8] H. Erdoğdu, E. Çavdar, G. Özdemir. "Comparison of Design Spectra in Turkish Earthquake Codes (TEC and TBEC) in Terms of Seismic Isolator Design "technical magazine, 628, 11127-11152, 2021.

[9] Z.Y. İlerlisoy, Y. Takva, B.B. Çolak and D. Bakbak. "Investigation of The Use of Seismic Base Isolation Systems in Residential Buildings "VI. International Earthquake Symposium Kocaeli, 2019.

[10] A.D. Luca and L.G. Guidi. "State of the art in the worldwide evolution of base insulation design " State of art in the worldwide evolution of base isolation design, 125,105722, 2019.

[11] H.İ. Polat "Comparatıve analysıs of a concrete structure made wıth conventıonal technıque and wıth base ısolatıon " 7th Geotechnical Symposium, 2017.

[12] STA4-V14.1 "Structural Analysis for Computer Aided Design" user guide.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Çeşitli Atık ve Artık Materyallerden Piroliz Yağı Eldesi ve Çalışma Koşullarının İncelenmesi

İbrahim AK[a], Fatih TAŞPINAR[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Ens., Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar**: **ibrhmak.1811@gmail.com**

ÖZET

Dünyadaki nüfusun hızlı artmasına ve gelişen teknolojiyle bağlantılı olarak enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Bununla birlikte fosil enerji kaynaklarının sınırlı ve yakın bir gelecekte tükenecek olması günümüzde alternatif enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde değerlendirilmesi mecburiyetini doğurmaktadır. Bu bağlamda atık ve artık maddelerin çevre ile ekonomiye yarar sağlayacak şekilde yakılarak piroliz işlemi ile pirolitik yağa dönüştürülmektedir. Bu işlemler sırasında oluşan pirolitik yağın oluşması için gerekli ortamların kapsamlı incelenmesi ve hangi yönlerde yarar sağlayacak olması incelenmiştir. Biyokütleden ve atıklardan biyoyağ oluşması ve bu oluşumun kullanılması sera gazı emisyonunu azaltır. Farklı hammaddelerden pirolitik yağ oluşum sürecini, piroliz proseslerinin ulaşım ve endüstriyel faaliyetlerde piroliz ürünlerinin fizikokimyasal özellikleri, uygulama için yükseltme tekniklerini araştırmaktadır. Biyoyağ üretimi için modern teknolojilerin gerektiği düşünülmektedir. Bu araştırma çalışmasında çeşitli atık ve artık materyallerden, örneğin tarımsal atıklar, kentsel çöpler, arıtma çamurları, odun-kömür ve atık lastiklerden pirolitik yağ eldesi incelenmiştir. Laboratuvar ölçeğinde kurulu pilot piroliz ünitesi kullanılarak deneysel çalışmalar ile pirolitik yağ eldesi sağlanmıştır. Piroliz işleminde ürün verimi için uygun koşullar oldukça değişkenlik gösterdiği süreçte atık nem içeriğinin çok önemli bir etken olduğu ve girişteki nemim %10 ve daha altı değerlerde sağlanması halinde işlemin 450-550°C aralığındaki çalışma koşullarında başarılı şekilde yapıldığı görülmüştür. Atık hacminde %75 ve üzeri oranlarda azaltım sağlanabildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Atık materyal, Geri kazanım, Piroliz, Pirolitik yağ*

Pyrolysis Oil Production from Various Waste and Residual Materials and Investigation of Working Conditions

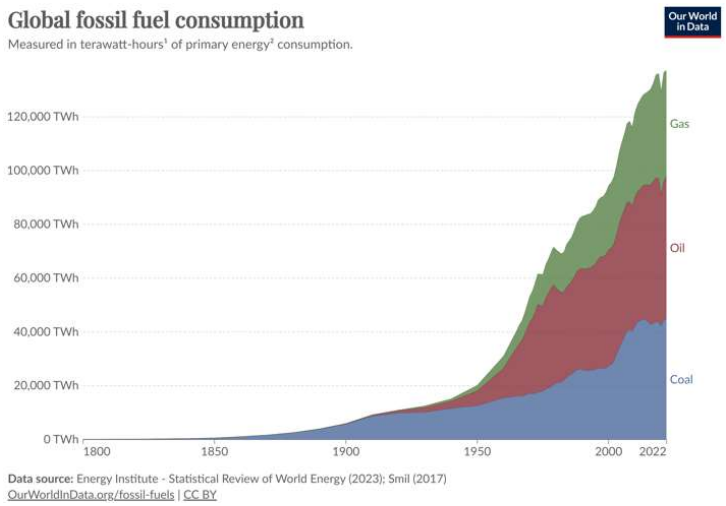
ABSTRACT

The demand for energy is constantly increasing in line with the rapid increase in the world's population and developing technology. However, the fact that fossil energy resources are limited and will be exhausted in the near future creates the necessity to utilize alternative energy resources more efficiently. In this context, waste and residual materials are converted into pyrolytic oil by pyrolysis process by burning in a way that will benefit the environment and the economy. A summarized review of the pyrolytic information generated during these processes and how the benefit is achieved. The formation and utilization of bio-oil from biomass and waste reduces greenhouse gas emissions. It investigates the process of pyrolytic oil formation from different feedstocks, physicochemical properties of pyrolysis products in transportation and industrial activities of pyrolysis processes, upgrading techniques for application. Bio-oil production is challenging and requires the incorporation of modern technologies. Pyrolysis plays an important role in the production of solid, liquid and gaseous fuels from biomass. In this research work, pyrolytic oil extraction from various waste and residual materials, such as agricultural waste, municipal garbage, sewage sludge, wood-coal and waste tires were investigated. Pyrolytic-oil was obtained by experimental studies in a pilot pyrolysis unit installed in the laboratory scale. It has been observed that waste moisture content is a very important factor in the pyrolysis process, where the conditions suitable for product yield vary considerably, and if the humidity is 10% or less, the process can be carried out successfully under operating conditions in the range of 450-550 °C. It has been observed that 75% and more reduction in waste volume can be achieved.

Keywords: *Waste material, Recovery, Pyrolysis, Pyrolytic oil*

I. GİRİŞ

Atık ve artıklar, çeşitli insan faaliyetleri sonucunda oluşur. Dünyanın birçok yerinde uygulanan mevcut atık yönetim sistemleri hem doğal çevre hem de insan sağlığı açısından önemli tehlikeler oluşturmaktadır [1]. Temel olarak fosil yakıt kaynaklarından üretilen enerjinin giderek artan tüketimi, ciddi çevresel bozulmalara yol açmaktadır. Fosil kökenli yakıtların rezervleri tükenmekte olup, bu rezervlerin 50 yıldan fazla dayanamayacağı beklenmektedir [2]. Sonuç olarak araştırmacılar, yenilenebilir ve atıklardan en iyi şekilde yararlanabilecek enerji üretmek için alternatif kaynaklar arıyorlar [3], [4]. Bu sonuçta hem fosil yakıtların tükenmesi hem de çevrenin bozulması sorunlarını çözecektir. Bu bağlamda farklı katı atıklar enerji üretimi için yenilenebilir kaynak olarak kullanılma potansiyeline sahiptir [4].



Şekil 1. Yıllara göre Küresel Fosil Yakıt Tüketimi

Her yıl büyük miktarda katı atık üretilmekte ve bu atıklar genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Arazi işgali, yeraltı su kirliliği, hava kirliliği gibi birçok soruna neden olan düzenli depolama alanlarının kullanımının, bu kirliliğe uzun vadeli bir çözüm olmadığı kesindir [5]. Bu kirliliği yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak bertaraf etmek karbon salınımını, karbon ayak izini, sera gazı etkilerini azalmakta öncülük edecektir. Piroliz, bu kirlilik kaynaklarının yenilenebilir enerji üretimi için etkili bir yoludur çünkü organik malzemelerin yanması sırasında atmosfere salınan karbondioksit miktarı, doğal bitkisel malzemeler tarafından emilen karbondioksitin bir kısmıyla dengelenebilir. Bu nedenle, piroliz yoluyla elde edilen enerji, karbon ayak izini azaltarak çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenektir. Piroliz, organik malzemelerin oksijen olmadan yüksek sıcaklıkta termal olarak parçalanması işlemidir. Bu işlem sırasında, organik malzemeler katı, sıvı ve gaz halindeki ürünlere dönüşür. Piroliz, biyokütle, tarımsal atıklar, orman atıkları, endüstriyel atıklar ve atık plastikler gibi çeşitli organik kaynaklardan biyo-yağ, biyokömür ve sentez gazı gibi ürünler elde etmek için kullanılır.

Dünya çapında pirolizin birçok olumlu etkisi vardır:

Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm: Piroliz, organik atıkların ve atık plastiklerin etkili bir şekilde geri dönüşümünü sağlar. Bu, çöp depolama alanlarının doluluk oranını azaltır, atık miktarını azaltır ve çevreye olan olumsuz etkilerini minimize eder.

Enerji Üretimi ve Yenilenebilir Kaynaklar: Piroliz, biyo-yağ ve sentez gazı gibi enerji kaynaklarının üretiminde kullanılır. Bu, fosil yakıtların kullanımının azaltılmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olur.

Karbondioksit Emisyonlarının Azaltılması: Piroliz ile elde edilen biyo-kömür, biyo-yağ ve sentez gazı gibi ürünlerin yanma sırasında atmosfere salınan karbondioksit miktarı genellikle fosil yakıtlara göre daha düşüktür. Bu, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlar.

Tarım ve Orman Yönetimi: Piroliz, tarım atıklarının ve orman atıklarının etkili bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olur. Bu, atık miktarını azaltırken, toprak verimliliğini artırır ve ormancılık alanında sürdürülebilirlik sağlar.

Ekonomik Fırsatlar ve İstihdam: Piroliz, atık malzemelerin ve biyo-kütle kaynaklarının değerlendirilmesi için yeni ekonomik fırsatlar yaratır. Aynı zamanda, piroliz tesislerinin inşası ve işletilmesi için yeni istihdam imkanları sağlar.

Teknolojik İlerleme: Piroliz, yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına olanak tanır. Araştırma ve geliştirme çalışmaları, piroliz teknolojisinin verimliliğini artırarak daha sürdürülebilir ve etkin hale getirilmesine yardımcı olur.

Bu nedenlerden dolayı, piroliz dünya çapında çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir teknolojidir ve sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir araç olarak görülmektedir.

Piroliz, atık ve artık hacmini azaltabilecek ve daha fazla kullanılabilecek petrol ve gazlar üretebileceği için, atık ve artık bertarafında potansiyel bir seçenek olarak kabul edilir [6], [7]. Ek olarak, atık piroliz sürecindeki düşük sıcaklık ve oksijen içeriği nedeniyle, dünyanın birçok ülkesinde halk tarafından şiddetle karşı çıkılan atık yakma ile karşılaştırıldığında, örneğin dioksinler gibi toksik kanserojen bileşikler büyük ölçüde azalır [8]. Katı atıklar gıda artığı, kağıt ve plastik gibi bileşenlerin bir karışımıdır. Gıda artığı, plastik, kağıt, tekstil, ahşap atıkları ve kauçuk içeriği azalan sırada %55.86, %11.15, %8.52, %3.16, %2.94 ve %0.84 olmuştur [9].

Piroliz esnasında termal ayrışması, sıcaklık artışına göre hemiselüloz, selüloz ve lignin yıkımı düzeninde gerçekleşir. Uçucuların uzaklaştırılmasından sonra kalan kısım kok ve külden oluşurken, kül biyokütlenin tamamen yandıktan sonra kalan kısmıdır [10-12]. Pirolizde temelde üç aşama vardır. İlk aşama, piroliz öncesi olup 120-200 ^{0}C arasında nispeten düşük bir kütle kaybı ile gerçekleşir. Bu aşamada, bağ kırılmaları, serbest radikallerin ortaya çıkışı ve su, CO ve CO_2 çıkışıyla birlikte karbonil grupların oluşumu gibi yapıda değişiklikler olur. İkinci aşama, başlangıçta beslenen ürünlerin önemli bir ağırlık kaybı eşliğinde katı ayrışmanın meydana geldiği ana piroliz işlemidir. Son aşama, C–H ve C–O bağlarının daha fazla bölünmesinden kaynaklanan sürekli gaz çıkışıdır [13, 22].

Piroliz sonrası elde edilen sıvı ürün, yüksek ısıl değere sahip, ölçülebilir, taşınabilir ve depolanabilir özellikleriyle, petrol türevi sıvı yakıtlar ve petrokimya endüstrisi girdisi için bir seçenek oluşturmaktadır [14]. Piroliz çalışmalarında elde edilen, sıvı, katı, gaz ürün verimlerini etkileyen başlıca parametreler ısıtma hızı, piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutudur. Bunun yanında, ısıtma hızının 100 °C/dk'nın üzerinde gerçekleştiği, hızlı piroliz ile statik retortlama şartlarında ortaya çıkan, sıvı ürün verimini ve kalitesini sınırlayan ikincil reaksiyonların etkisi azaltmakta ve yüksek verimde sıvı ürün elde edilmesine olanak sağlanmaktadır [15-18].

Pirolitik yağ elde etmek için birçok hammadde kullanılmaktadır. Ahşabın, plastiğin veya diğer biyokütlenin oksijensiz bir ortamda yeterli sıcaklığa ısıtılması üzerine uçucu bileşenler üretilir. Soğuduktan sonra, bir kısım gaz halindedir (hidrojen, karbon monoksit, gazlı hidrokarbonlar), diğerleri ise piroliz yağı olarak adlandırılan sıvı formdadır. Bu yağ yoğun bir yakıt kaynağıdır. Isıtma ve buhar üretimi gibi uygulamalar için yağ yakıcı bir brülör tarafından yakılabilir.

Fischer-Tropsch prosesi ile biyo-yağın Dizel yakıta yükseltilmesi mümkündür, ancak pratik küçük ölçekli olmayabilir. Farklı bir yol olarak da son zamanlarda katalizör olarak Red Mud (Kırmızı Çamur) aracılığıyla biyo-yağı yükseltmenin ucuz ve açık kaynaklı bir yolu keşfedildi [12].

Biyokütleden maksimum sıvı ürün elde etmek için hızlı piroliz kullanılmalıdır. Yüksek verim için hızlı ısıtma, reaktörde oluşan gazın kısa alıkonma zamanı ve yoğunlaşabilen gazın hızlıca soğutulması esastır. Hızlı ısıtma ile kömürleşme önlenir. Bunun için de biyokütlenin tanecik boyutunun olabildiğince küçük olması gerekir. Gaz oluşumundan sonra soğutmaya kadar geçen zaman, daha başka yan reaksiyonları önlemek için oldukça az olmalıdır. Hızlı soğutma ile de kondenzasyon reaksiyonlarının önüne geçilir. Proses sonrası biyo-yağın işlenmeden bekletilmesi, içerisinde bulunabilecek kül ve kok gibi maddelerin katalitik etkisiyle başka kimyasal reaksiyonların oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle bekletilmeden en son ürüne işlenmesi uygundur. Biyokütle çeşitlerinin ısı, kül ve su içerikleri ve hızlı piroliz sonucundaki ürünlerin kok/kül, kondensat ve gaz değerleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Ayrıca, biyokütlenin ihtiva edebileceği tuzların (Na_2CO_3, K_2CO_3 gibi) piroliz işlemlerine katalizör etkisi de vardır. Üretilen yağ, asit özelliği taşır. Bu nedenle özellikle yüksek sıcaklıklarda korozyona neden olur. Proseslerde polimerleşme dolayısı ile tıkanma problemleri de ortaya çıkabilmektedir [12].

Piroliz, teknoloji bazında yeni olmamakla birlikte uygulaması da küçük ölçekli düzeneklerle sınırlı kalmaktadır. Geleneksel uygulamaları göz önünde bulundurulursa, pirolizden kömür eldesi amaçlı

faydalanılması oldukça yaygındır. Piroliz yağları %25 ortalama su içeriği, organik fraksiyonunun oksijen içeriği ve büyük karmaşık moleküler bir yapı sergiler. Su içeriği ayrıca kısmi faz ayrımına neden olabilir ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Ayrıca, hidrofilik doğası ve polariteleri nedeniyle, hızlı piroliz yağları hidrokarbonlarla karışmazlar. Piroliz yağları bir rafineride fosil kökenli hidrokarbon fraksiyonları ile bir karışım olarak yükseltilemez. Spesifik özellikleri nedeniyle, piroliz yağlarının kullanımı çok sayıda sorunu gündeme getirmektedir. Şu anda, çalışılan ana yükseltme yolları, ısı veya elektrik üretmek için piroliz yağının kazanlarda veya gaz türbinlerinde yanması veya kimya için üretilmesidir.

Bu çalışma kapsamında çeşitli atık ve artık materyallerden, örneğin tarımsal atıklar, kentsel çöp, odun-kömür ve atık lastiklerden pirolitik yağ eldesi çalışılmıştır. Hali hazırda Çevre Müh. Bölümü laboratuvarında kurulu pilot piroliz tesisinde gerekli güncellemeler yapılmış deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Piroliz yapılacak materyal karışımı çeşitli ağırlıklarda (100 gramdan 1 Kg'a kadar) katı atık karışımı (menü) olarak hazırlanmıştır. Burada arıtma çamurları, bahçe atıkları, atık lastikler, atık plastikler ve genel kentsel katı atık (evsel çöp) materyalleri hazırlanıp, kurutulup menü hazırlanmış ve piroliz işlemine tabii tutulmuştur. Bu sayede piroliz ve ürün verimi için uygun koşullar atık türüne veya hazırlanan menüye göre optimize edilip ve ürün verimine etkisi çalışılmıştır. Ürün olarak piroliz sıvısı "syn-oil" ve katı ürün olarak kömür "char" elde edilmesi konularında deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Çeşitli katalizör kullanımı, piroliz sıcaklığı, dönen devir sayısı, işlem süresi, ürün verimi vb. gibi parametreler karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL METOT

Hammadde ve Menülerin sıcaklıklarda ve farklı koşullarda değişiminin takip edilmesi için Şekil 2' deki Yatay döner tamburlu tip laboratuvar ölçekli piroliz reaktörü kullanılmıştır. Reaktör çıkışına sıcaklığa dayanıklı plastik borular kullanılmıştır. Reaktör 200 mm çapında, 800 mm uzunluğunda, dönme hızı 0-60 RPM olabilen PID kontrollü sistem olarak geliştirilmiştir. Bu sayede sıcaklık, devir hızı, bekleme süresi cihaz üzerinde ayarlanabilmektedir. 5 kg' a kadar atık işleyebilen, 316 paslanmaz çelikten yapılmış olup, reaktörü çevreleyen 2000 Watt izole edilmiş bir ısıtıcı rezistanslar bulunmaktadır. 750 °C ye kadar maksimum sıcaklık çıkartılabilir. Sisteme bağlı iki adet ısıl çift bulunmaktadır. Biri rezistans sıcaklığını diğeri reaktörün iç sıcaklığını göstermektedir.



Şekil 2. Döner tamburlu reaktör

Soğutma sistemi olarak buz banyosu gerçekleştirilmiştir. Buz banyosunda -10°C düşürülmüş ve gazın aniden içerisinden geçirilerek yoğuşması sağlanmıştır. Toplamda 3 adet bulunan soğutucu şişeler aynı zamanda da her deney sonrası sökülüp toplanan sıvılar şişelerden boşaltılarak alınmaktadır. Laboratuvar ölçekli reaktör toplamda 4 aşamadan oluşmaktadır. Reaktör bölümü, soğutma ve toplama bölümü, filtre bölümü, deşarj bölümüdür.



Şekil 3. Soğutma Şişeleri

Reaktörden çıkan gazları filtrelemek amacıyla yapılmış olan düzenek dolgulu kolon filtresidir. Bu düzenek ile sistemden çıkan ve tutulmayan çok uçucu gazlar Aktif Karbon – Titanyum oksit filtrelerinde tutulmakta bu sayede atmosfere verilmemektedir. Bu filtreler belirli deney aşamalarından sonra değiştirilmekte ve çıkan eski filtreler atık işlemlerine tabi tutulmaktadır.



Şekil 4. Hava Filtresi

Reaktörden çıkan gazları Testo-350 Gaz Analizörü ile ölçülmüştür. Çıkan gazların içerikleri değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Testo 350 Gaz Analizörü

Alınan numuneler şu şekildedir; Düzce Atıksu Arıtma Tesisinden arıtma çamuru, Futurapet geri dönüşüm fabrikasından alınan pet şişe atıkları, Düzce Cumayeri ilçesinden fındık kabuğu, ömrünü tamamlamış araba lastikleri, Düzce Sanayisinden temin edilmiş atık kablo parçaları, ağaç işleme fabrikalarından temin edilen kestane, köknar, çam talaşları vb. gibi artık ve atık materyaller kullanılmıştır. Temin edilen hammaddeler ilk olarak oda sıcaklığında neminin azaltılması için 72 saat bekletilmiştir.





Şekil 6. Numunelerin oda sıcaklığında bekletilmesi

Numuneler oda sıcaklığında bekletildikten sonra maksimum verim elde etmek için hazırlanan örneklerden, porselen krozeye, %0.01 duyarlılıkta bir miktar alınarak, 104±2°C'a ayarlanmış etüvde bekletilir. İki tartım arasındaki fark eşitleninceye kadar 2 saat daha bu sıcaklıkta tutulup, işlem tekrarlanır.



Şekil 7. Numunelerin Etüvde Kurutulması

Farklı menüler oluşturularak veya tek çeşit yapılacak olan deneyler Düzce Üniversitesi laboratuvarında bulunan tesiste 400-600 ^{0}C arasında ısıtılarak piroliz işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Hammadde olarak tercih edilen numuneler etüv kullanılarak nem oranlarını en aza indirilmiş, elde edilen sonuçların maksimum verime çıkartılması sağlanmıştır. Tane büyüklüğü, sıcaklık derecesi, sıcaklık artış hızı, soğutma hızı, dönme devir sayısı gibi birden fazla kriter reaktörümüzün sonuçlarını etkileyecek parametrelerdir. Yaklaşık dakikada 10°C ısıtma hızı ve dakikada 3 devir hızı ile döndürülmüştür.



Şekil 8. Numune menüsü



Şekil 9. Elde Edilen Pirolitik Sıvı

Ahşap Atıklarından Piroliz

Ahşap atıklarından piroliz işlemi, ahşap malzemelerin yüksek sıcaklıkta oksijensiz bir ortamda termal bozunma sürecine tabi tutulmasıdır. Bu süreç sonucunda, ahşap malzemeler gazlar, sıvılar ve katı artıklara dönüşür. Piroliz işlemi genellikle biyokütle enerjisi üretiminde ve ahşap atıkların geri dönüşümünde kullanılır. Ahşap pirolizinden elde edilen ürünler arasında şunlar bulunabilir:

Piroliz gazı: Karbon monoksit, hidrojen, metan gibi gazlar içerir ve enerji üretiminde yakıt olarak kullanılabilir.

Piroliz yağı: Sıvı haldeki üründür ve biyoyakıt olarak kullanılabilir veya kimyasal endüstride çeşitli amaçlar için işlenebilir.

Karbon siyahı: Katı atık ürün, genellikle karbon içeriği yüksek olan ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir malzemedir. Bu şekilde, ahşap atıkların piroliz yoluyla işlenmesi hem enerji üretimine katkı sağlar hem de atık miktarını azaltır, böylece çevresel etkileri azaltır.

Atık Lastiklerdeki Piroliz

Ömrünü tamamlamış lastiklerden piroliz işlemi oldukça yaygın bir uygulamadır çünkü lastiklerin geri dönüşümü ve atıklarının yönetimi için etkili bir yöntem sunar. Bu işlemde, lastikler yüksek sıcaklıkta oksijensiz bir ortamda termal bozunmaya tabi tutulur. Lastikler pirolize edildiğinde:

Piroliz gazı: Karbon monoksit, hidrojen, metan gibi gazlar içerir ve enerji üretiminde veya kimyasal endüstride kullanılabilir.

Piroliz yağı: Sıvı haldeki bir üründür ve yakıt olarak kullanılabilir veya kimyasal işlemlerde kullanılabilir.

Karbon siyahı: Katı haldeki bir üründür ve endüstriyel uygulamalarda pigment, lastik üretimi veya diğer malzemelerin takviyesi için kullanılabilir.

Bu şekilde, lastiklerin piroliz işlemi, atık yönetimi için etkili bir yöntem sağlar ve atıkların geri dönüşümünde ekonomik olarak değerli ürünler elde edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, bu işlem çevresel olarak da faydalıdır çünkü atık lastiklerin çevreye zarar vermesi önlenir ve enerji veya kimyasal ürünlerin üretimi için daha sürdürülebilir bir kaynak sağlanır. Atık lastiklerin cinsine bağlı olarak %35-45 arasında piroliz yağı elde etmek mümkündür. Piroliz yağı C6-C24 aralığında kompleks organik bileşikleri içeren kaliteli bir yakıttır. Benzen, toluen, ksilen, limonen gibi değerli hafif hidrokarbonları içerir. Pirolitik yağda naftalin, fenantren, fluoren ve difenil gibi polisiklik aromatikler büyük yer tutar. Sıcaklığın artması bu bileşiklerin konsantrasyonlarını da arttırmaktadır [15, 22].

Evsel Atıkların Pirolizi

Evsel atıkların pirolizi, çöp, organik atıklar, kağıt, karton, plastik ve diğer evsel atıkların yüksek sıcaklıkta oksijensiz ortamda termal bozunma işlemine tabi tutulmasıdır. Bu süreç sırasında, evsel atıklar gaz, sıvı ve katı artıklara dönüşür. Piroliz işlemi genellikle evsel atıkların bertarafı ve enerji üretimi için kullanılır. Evsel atıkların pirolizi sonucunda elde edilen ürünler şunlar olabilir:

Piroliz gazı: Karbon monoksit, hidrojen, metan ve diğer hidrokarbonlar gibi gazlar içerir. Bu gazlar, ısınma, elektrik üretimi veya endüstriyel süreçlerde yakıt olarak kullanılabilir.

Piroliz yağı: Sıvı haldeki bir üründür ve biyoyakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca, kimyasal endüstride çeşitli ürünlerin üretiminde kullanılabilir.

Karbon siyahı: Katı atık bir üründür ve genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Örneğin, lastik üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılabilir.

Evsel atıkların pirolizi, atık miktarını azaltırken aynı zamanda enerji ve kaynak geri dönüşümü sağlar, böylece çevresel etkileri azaltır. Bu işlem, atık yönetimi ve enerji üretimi alanlarında önemli bir rol oynar.

Evsel atıkların pirolizi, evlerden ve diğer tesislerden toplanan organik ve inorganik atıkların yüksek sıcaklıkta termal bozunma işlemine tabi tutulmasıyla gerçekleşen bir süreçtir. Bu işlem, atıkların enerji geri kazanımı ve azaltılması için yaygın olarak kullanılır.

Kablo Atıklarının Pirolizi

Kablo atıkları, geri dönüşüm tesislerinden veya diğer kaynaklardan toplanır. Bu atıklar genellikle plastik dış kaplamalarıyla birlikte metal iletkenleri içerir. Önce plastik dış kaplamalarından ayrıştırılır. Bu işlem genellikle mekanik yöntemler veya termal işlemlerle gerçekleştirilir. Hazırlanan kablo atıkları, piroliz reaktörüne gönderilir. Bu reaktörde, kablo atıkları yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz bir ortamda termal bozunma işlemine tabi tutulur. Piroliz reaktöründe yüksek sıcaklık altında yanar. Plastik dış kaplamalar yanar ve gazlar haline gelirken, metal iletkenler geriye kalır. Plastik dış kaplamaların geri dönüşümü için etkili bir yöntem sağlarken aynı zamanda metal iletkenlerin de geri kazanılmasını sağlar. Bu işlem, atık miktarını azaltırken değerli malzemelerin geri dönüşümüne katkıda bulunur ve çevresel etkileri azaltır.

Arıtma Çamurunun Pirolizi

Arıtma çamurundan piroliz, arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurun yüksek sıcaklıkta termal bozunma işlemine tabi tutulmasıdır. Bu işlem, atık çamurun azaltılması, bertaraf edilmesi ve enerji geri kazanımı için kullanılır. Arıtma tesislerinden elde edilen atık çamur, öncelikle depolama tanklarına veya konteynerlere aktarılır. Bu çamur genellikle organik ve inorganik maddelerin karışımını içerir. Atık çamur, öncelikle kurutma işlemine tabi tutulur. Bu işlem, çamurun nem içeriğini azaltarak piroliz işlemi için hazırlar. Kurutulmuş atık çamur, piroliz reaktörüne gönderilir. Bu reaktör, yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz bir ortamda çamurun termal bozunmasını sağlar. Organik maddeler gazlar, sıvılar ve katı artıklara ayrışırken, inorganik maddeler genellikle katı artık olarak kalır. Piroliz sonucunda elde edilen gazlar, sıvılar ve katı artıklar ayrıştırılır. Gazlar ve sıvılar genellikle soğutma ve ayrıştırma işlemleriyle elde edilirken, katı artıklar uygun şekilde bertaraf edilir veya geri dönüştürülür.

Arıtma çamurunun pirolizi, atık miktarının azaltılması, enerji geri kazanımı ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir yöntemdir. Bu işlem, arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurun etkili bir şekilde bertaraf edilmesini sağlarken aynı zamanda enerji üretimine katkıda bulunur.

Deneysel Çalışma Metodu

Bu çalışma kapsamında mühendislik fakültesi çevre mühendisliği bölümünde hali hazırda kurulu bulunan pilot piroliz ünitesi kullanılmıştır. Çalışma 3 ana kaide üzerine yürütülmüştür :

- Atık ve artık materyallerin hazırlanması
- Piroliz ünitesinin çalıştırılması ve gaz ölçümlerinin yapılması
- Ürün verimine etki eden sıcaklık devir sayısı menü kompozisyon içeriği, atık karakteristikleri gibi parametreler incelenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 1. Deney Sonuçları

	Numune Özellikleri		Reaktör Verileri				Sonuçlar	
Deney No	Ürün	Numune Miktarı (gr)	Isıtma Derecesi (°C)	Süre (dk)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Devir (dk)	Cüruf (Gr)	Pirolitik Sıvı (Gr)
Deney 1	Fındık Kabuğu	500	500°C	45	10	4	117,94	-
Deney 2	Fındık Kabuğu	350	520°C	45	10	4	96,579	57,69
Deney 3	Fındık Kabuğu	200	500°C	45	10	4	76,6	57,4
	Çam Talaşı	80						
Deney 4	Fındık Kabuğu	150	520°C	45	10	4	-	-
	Kömür	150						
	Atık Plastik	150						
	Atık Kablo	100						
	Köknar Talaşı	130						
	Arıtma Çamuru	150						

III. SONUÇLAR

Deneyler esas olarak parçalanmış lastiklerin, ahşap atıkların, evsel atıkların, kablo atıklarının, pet şişe atıklarının, arıtma çamuru artıklarının sıvı yakıta dönüştürülmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Parçalanmış ve küçük parçacıklara dönüştürülmüş olan bu materyalleri yakıt elde edildikten sonra ve bu yakıtların özelliklerine yönelik analitik testler yapılacak aynı zamanda elde edilen değerler konvansiyonel dizel yakıtla karşılaştırılıp karar verilecektir.

Biyokütleyi faydalı enerji ürünlerine, özellikle de tükenmekte olan fosil yakıtların yerine iyi bir alternatif olabilecek sıvılara dönüştürebilecek bir proses elde etmek gereklidir. Termokimyasal dönüşüm yöntemleri, çevre dostu prosesler olduğundan bu gereksinimi karşılamak için en uygun olanlardır. Piroliz, diğer termokimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında daha kaliteli ürünler sağladığından önemli miktarda ilgi görmüştür.

Yapılan deneylerde kullanılan metotlar farklı reaktörler bulunmakta ancak döner tamburlu raktörler içerisinde atıkları devamlı karıştırdığı için daha fazla verim elde etmek mümkündür. Tane boyutu, sıcaklık artış hızı, reaktör alıkonma süresi ve nem değerleri en önemli kriterlerdir. Tane boyutunun küçük olması, ısıtma hızının yüksek olması maksimum oranda verim elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Tüm bu süreçlerin yanında hızlı bir soğutma sistemi kurulmalıdır. Elde edilen sentetik gazın parlayıcı özelliği tespit edilmiş fakat pirolitik sıvının parlayıcı özelliği yoktur.

IV. TARTIŞMA

Piroliz bazlı sentetik yakıtlar, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında potansiyel sera gazı emisyonunu %60-80'e kadar azaltmanın anahtarlarından biri olarak kabul edilebilir. Biyokütlenin artan sıcaklıkla daha uzun süre parçalanması nedeniyle sıcaklığın sıvı verimleri üzerinde sinerjik etki yaratabileceği genel bir kabuldür. Hammaddenin uygun seçimi, yüksek biyo-yağ verimi elde etmek için çok önemli bir faktördür.
Soğutma teknolojileri için yüksek teknolojili ve pahalı sistemler mevcut ancak ticari olarak kullanılmamaktadır. Piroliz sistemleri daha fazla geliştirilmeli maliyet çalışmaları yaparak daha az maliyetlere düşürülmelidir.

V. ÇIKARIM

Piroliz ekonomisi üzerine pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen bunların çoğu küçük veya pilot ölçekli üretimle sınırlıdır. Endüstriyel ölçekli piroliz tesisi için ayrıntılı hesaplama, bu teknolojinin pratik aşama uygulamalarına daha geniş ölçüde başlatılması açısından önemlidir. Sektörel bazda atık materyallerden değerli ürün eldesi için teknoloji geliştirebilme imkanı sağlanacaktır. Atık ve artık materyallerin geri dönüşümü ve enerji eldesi mümkün olacaktır. Elde edilen ürünlerin çalışma koşulları hakkında bilgi sahibi olunacaktır. Verilerin detaylı değerlendirilmesi, uluslararası atıf indekslerine giren dergilerde yayınlanmak üzere bilimsel makale/makalelerin hazırlanması veya gönderilmiş olması, böylece ülkemizin uluslararası literatürdeki etkinliğine katkı sağlayacaktır. Proje sonuçlarının ilgili ve yetkili kurumlara duyurulmuş olması, projenin başarılı olup olmadığını değerlendirmede kriter olarak kullanılabilir. Sonuç raporları yerel yönetimlerle veya başka çalışma gruplarıyla paylaşılarak bir takım yeni çalışmalara öncülük edebilir. Bu da başlı başına bir başarı kriteri olarak değerlendirilebilir. Belediye ve katı atık konusunda çalışan firmalar ile ortak çalışma yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı'nın Proje No: 2022.06.02.1301 ve Proje Adı: "Çeşitli Atık ve Artık Materyallerden Piroliz Yağı Eldesi ve Çalışma Koşullarının İncelenmesi" isimli BAP çalışması kapsamında desteklenmektedir. Bu vesile ile öncelikle DÜBAP birimine teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada bana bilgi ve tecrübelerini esirgemeden her türlü yardımda bulunan hocam, Sayın Prof. Dr. Fatih TASPINAR 'a Teşekkürü borç bilirim. Bu çalışmalar esnasında manevi desteğini esirgemeyen aileme ve arkadaşım Dilara Zarf' a teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

[1] Velghe I, Carleer R, Yperman J, Schreurs S. Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products. J Anal Appl Pyrol 2011;92:366–75.

[2] Hosseini SE, Wahid MA. Hydrogen production from renewable and sustainableenergy resources: Promising green energy carrier for clean development. Renew Sustain Energy Rev 2016;57:850–66.

[3] Jahirul MI, Brown RJ, Senadeera W, Ashwath N, Rasul MG, Rahman MM, et al. Physio-chemical assessment of beauty leaf (Calophyllum inophyllum) as secondgeneration biodiesel feedstock. Energy Rep 2015;1:204–15.

[4] Jahirul MI, Rasul MG, Chowdhury AA, Ashwath N. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological. Review 2012;5:4952–5001

[5] Huber G-W, Dumesic J-A (2006) An overview of aqueous-phase catalytic processes for production of hydrogen and alkanes in a biorefinery. Catal Today 111(1–2):119–132

[6] Bridgwater A-V (2012) Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenerg 38:68–94

[7] Krutof A, Hawboldt K-A (2018) Upgrading of biomass sourced pyrolysis oil review: focus on co-pyrolysis and vapour upgrading during pyrolysis. Biomass Convers Biorefinery 8(3):775–787

[8] Baldwin R-M, Feik C-J (2013) Bio-oil stabilization and upgrading by hot gas filtration. Energy Fuels 27(6):3224–3238

[9] Xiu S, Shahbazi A (2012) Bio-oil production and upgrading research: a review. Renew Sustain Energy Rev 16(7):4406–4414

[10] Mei Y, Chai M, Shen C, Liu B, Liu R (2019) Effect of methanol addition on properties and aging reaction mechanism of bio-oil during storage. Fuel 244:499–507

[11] < URL > https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-020-01063-w

[12] Farooq A, Shafaghat H, Jae J, Jung S-C, Park Y-K (2019) Enhanced stability of bio-oil and diesel fuel emulsion using Span 80 and Tween 60 emulsifiers. J Environ Manage 231:694–700

[13] Vispute T-P, Huber G-W (2009) Production of hydrogen, alkanes and polyols by aqueous phase processing of wood-derived pyrolysis oils. Green Chem 11(9):1433–1445

[14] Gandarias I, Barrio V-L, Requies J, Arias P-L, Cambra J-F, Güemez M-B (2008) From biomass to fuels: hydrotreating of oxygenated compounds. Int J Hydrogen Energy 33(13):3485–3488

[15] Zhang X, Wang T, Ma L, Zhang Q, Jiang T (2013) Hydrotreatment of bio-oil over Ni-based catalyst. Biores Technol 127:306–311

[16] Tang Z, Lu Q, Zhang Y, Zhu X, Guo Q (2009) One step bio-oil upgrading through hydrotreatment, esterification, and cracking. Ind Eng Chem Res 48(15):6923–6929

[17] < URL > https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227620303768

[18] Padmaja K-V, Atheya N, Bhatnagar A-K, Singh K-K (2009) Conversion of Calotropis procera biocrude to liquid fuels using thermal and catalytic cracking. Fuel 88(5):780–785

[19] Hew K-L, Tamidi A-M, Yusup S, Lee K-T, Ahmad M-M (2010) Catalytic cracking of bio- oil to organic liquid product (OLP). Biores Technol 101(22):8855–8858

[20] Mei Y, Chai M, Shen C, Liu B, Liu R (2019) Effect of methanol addition on properties and aging reaction mechanism of bio-oil during storage. Fuel 244:499–507

[21] J.L. Vidal, V.P. Andrea, S.L. MacQuarrie, F.M. Kerton, Oxidized biochar as a simple, renewable catalyst for the production of cyclic carbonates from carbon dioxide and epoxides, ChemCatChem 11 (16) (2019) 4089–4095, https://doi.org/10.1002/cctc.201900290

[22] Boutin O, Ferrer M, Lede J. Flash pyrolysis of cellulose pellets submitted to a concentrated radiation: Experiments and modeling. Chemical Engineering Science. 2002;57:15-25

[23] Downie A, Crosky A, Munroe P. Physical properties of biochar. In: Lehmann J, Joseph S, editors. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London, UK: Earthscan; 2009

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Hassas Tarım Uygulamalarının İnsansız Hava Aracı Kullanılarak İncelenmesi

Hayriye Uluçay[a], Nasır Çoruh[a], Fatih Acar[a], Nezih Kaya[a]*

[a]Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik – Elektroniği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** ncoruh@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Birleşmiş Milletler raporunda 2050 yılında dünya nüfusunun 9,8 milyar olacağı öngörülmektedir. Nüfus artışı beraberinde çevre kirliliğiyle besine erişim sorunlarını getirmektedir. Bu durumda, güncel teknolojilerin, havacılık sistemlerinin kullanılarak daha verimli hassas tarım uygulamalarının geliştirilmesine yol açmaktadır. Hassas tarımla uzaktan algılama ile toprak özelliklerinin belirlenmesi, bitki örtüsü sınıflandırması ve izlenmesi, verim tahminleri, su stresi tespiti, hastalıklı bitkilerin ve zararlıların tespiti gibi işlemlerini kolaylaştırarak, daha az zaman ve iş gücü ile daha verimli tarım yapılması sağlanmaktadır. İHA'lar ile, taşıyabildikleri sensörler ve görüntü sistemler ile hassas tarım için gerekli görüntüler sağlanabilmektedir. Otonom İHA'lar büyük yüzölçümlü alanların ilaçlanması ya da gözlenmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanım kolaylığı, uzun dayanıklılık, yüksek uçuş hızı, faydalı yük taşıma kapasitesi, kontrol karmaşıklığı gibi unsurlar İHA tipi seçiminde etkilidir. Havacılık otoriteleri tarafından İHA'lar ile ilgili çeşitli kısıtlamalar konulmaktadır. Diğer taraftan da döner kanat İHA'larda kullanılan itki motorlarının yanında görevleri için çeşitli sensörleri ya da sistemlerin çalışmasında kullanılan enerjinin yönetimi de önemli bir husustur. Bu çalışmada, dünyada ve ülkemizde İHA kullanımı için sivil havacılık otoriteleri tarafından uygulanan çeşitli kısıtlamalardan bahsedilerek ülkemizdeki hassas tarım uygulamaları dünyadaki güncel çalışmalar enerji yönetimi ve İHA donanım seçimleri de göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Yönetimi, Hassas Tarım, İHA

A Review on Precision Agriculture Practices Using Unmanned Aerial Vehicle

ABSTRACT

In the United Nations report, it is predicted that the world population will be 9.8 billion in 2050. Population growth brings with it environmental pollution and food access problems. In this case, it leads to the development of more efficient precision agriculture applications by using current technologies and aviation systems. Precision agriculture facilitates processes such as determination of soil properties, vegetation classification and monitoring, yield estimations, water stress detection, detection of diseased plants and pests with remote sensing, and more efficient agriculture with less time and labour. UAVs can provide the necessary images for precision agriculture with the sensors and imaging systems they can carry. Autonomous UAVs are used in applications such as spraying or monitoring large areas. Factors such as ease of use, long endurance, high flight speed, payload carrying capacity and control complexity affect the choice of UAV type. Aviation authorities impose various restrictions on UAVs. On the other hand, besides the propulsion engines used in rotary wing UAVs, the management of the energy used in the operation of various sensors or systems for their missions is also an important issue. In this study, various restrictions imposed by civil aviation authorities for the use of UAVs in the world and in our country are mentioned.

Keywords: Energy Management, Precision Agriculture, UAV

I. GİRİŞ

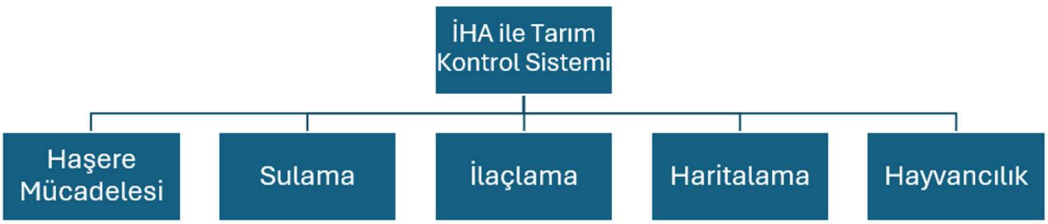
Birleşmiş Milletler Yiyecek ve Tarım Organizasyonu (Food and Agriculture Organization) tarafından yapılan bir araştırmaya göre 2050 yılına kadar 9,8 milyara çıkması beklenen nüfusun, yiyecek ihtiyacının günümüze göre %70 artırması tahmin edilmektedir. Bu durum artan nüfus, çevre kirliliği ve sanayileşme nedeniyle tarım alanlarındaki azalma sonucunda tarımsal verimliliğin arıttırılması gerektiğini

göstermektedir [1]. Hassas tarım, tarımsal üretimde verimin arttırılması çalışmalarının bir sonucudur. Geleneksel tarımda, tarım alanlarında kullanılan gübreleme, ilaçlama gibi uygulamalar belirli noktalarda ihtiyaç olmasa bile genellikle homojen bir şekilde uygulanamamaktadır [2]. Ayrıca ilerleyen zamana bağlı olarak artan tarım ihtiyacına göre, genişleyen tarım alanlarının kontrolü, gözlemi ve yönetimi zorlaşmaya başlamıştır ve yine bu ihtiyacı karşılamak için hassas tarım uygulamalarına başvurulmaktadır [3].

Hassas tarım uygulamalarında uzaktan algılama sistemlerinin kullanımı ile tarım alanlarının birçok yönden izlenmesi yapılabilmektedir. Ayrıca ürüne fiziksel temas sağlamadan bilgi toplanabilmesi bir başka avantajıdır. Bu gibi sistemler ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, üretimdeki verimi arttırmaktadır. Uzaktan algılamada, sensörün ilgilenilen nesneye olan mesafesi, görüntü edinme sıklığı ve zamanlaması, konum ve kapsama alanı gibi parametreler belirleyicidir [4]. Bu yöntem de örneğin bulut yoğunluğu görüntülemede belirsizlik oluşturabilmektedir [5].

İnsansız hava araçları (İHA) uzaktan algılama ve uydu sistemleri ile karşılaştırıldığında taşıyabildikleri sensörler ile hassas tarım uygulamaları çok daha düşük irtifadan daha yüksek çözünürlükte, kalitede ve hassasiyette veriyi hızlı toplayabiliyor olması tarım alanlarının izlenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sayede ürünler de gerekli iyileştirmeler için zaman tasarrufu ve erken müdahale imkânı kazanılmaktadır. Bunun dışında, faydalı yük olarak kullanılan farklı donanımlar ile ilaçlama, sulama gibi uygulamalar da yapılabilmektedir [6, 7].

İHA'lar ile tarım kontrol/izleme sistemlerinde genellikle yapılan uygulamalar Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de belirtilen her uygulama için kullanılan İHA tipi ve sensörler değişkenlik gösterebilmektedir. [8].



Şekil 1. İnsansız Hava Araçları ile Tarım Uygulamaları [8]

İHA'ların hassas tarımda kullanımı konusunda çalışmalar her geçen gün artmaktadır [8]. Web of Science tabanında 2023 yılı için bu alanda yaklaşık bin civarında çalışma olduğu tespit edilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, İHA tipinin uygulama hassasiyetine göre değişiklik gösterdiği ve birçoğunun benzer İHA yapısı kullandığı tespit edilmiş, daha çok görüntü işleme ve haritalama üzerine araştırmaların yoğunlaştığı belirlenmiştir [9, 10, 11].

Bu çalışmada, İHA yapıları ve kullanımı, ülkemizde ve dünyadaki başlıca sivil havacılık otoriteleri tarafından konulmuş kurallar çerçevesinde anlatılmaktadır. İkinci bölümde hassas tarım uygulamalarında kullanılan insansız hava araçları ve taşıyabildikleri yükler ve sensörlerden bahsedilmektedir. Üçüncü ve dördüncü bölümde sırasıyla çeşitli İHA uygulamalarında kullanılan sensör tipleri ve İHA ile yapılan hassas tarım uygulamaları konusunda ülkemizde ve dünyada yapılmış olan çalışmalardan örnekler karşılaştırmalı olarak belirtilmektedir.

II. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

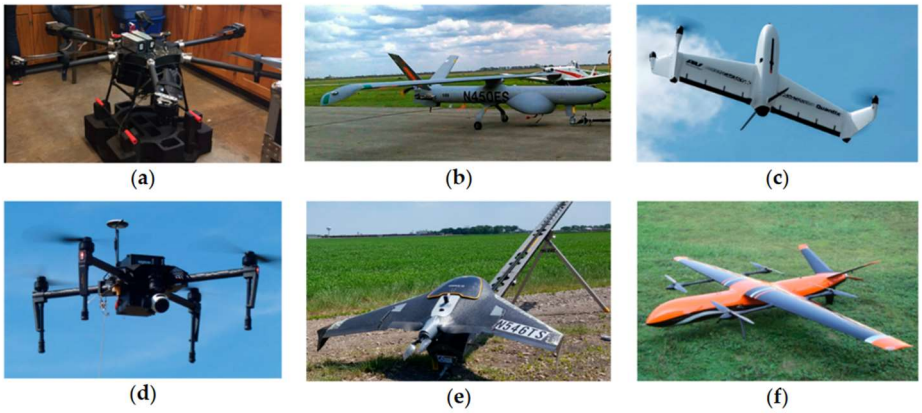
İHA'lar yapısal olarak sabit kanat ve döner kanat olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Döner kanatlı İHA'lar ayrıca, tek rotorlu, çok rotorlu ve hibrit olmak üzere üç farklı kategorileri de bulunmaktadır. İHA'lar dikey iniş kalkış yeteneği, uçuş süresi, faydalı yük taşıma kapasitesi gibi parametrelere göre karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir [5].

Tablo 1. İHA Tiplerinin Yetenek Karşılaştırması [5]

İHA Çeşidi	Dikey İniş-Kalkış Yeteneği	Uçuş Süresi	Faydalı Yük Kapasitesi
Sabit Kanat	Hayır	Yüksek	Orta-Yüksek
Tek rotorlu	Evet	Orta-Yüksek	Orta-Yüksek
Çok rotorlu	Evet	Düşük	Düşük
Hybrit	Evet	Orta-Yüksek	Orta

Şekil 2'de kullanımda olan farklı İHA yapıları gösterilmektedir. Sabit kanatlı İHA'lar yüksek seyir irtifalarında ve hızlarında uçuş yapabilirler, görüntüleme uygulamalarında santimetre düzeyinde doğruluk

sağlayabilmektedirler. Ayrıca yüksek ağırlıklı faydalı yükler taşıyabilmeleri, uzun süre havada kalabilmeleri bakımından tarımda ilaçlama uygulamaları gibi yoğun ağırlık kapasitesi ihtiyacının karşılayabilmektedir.



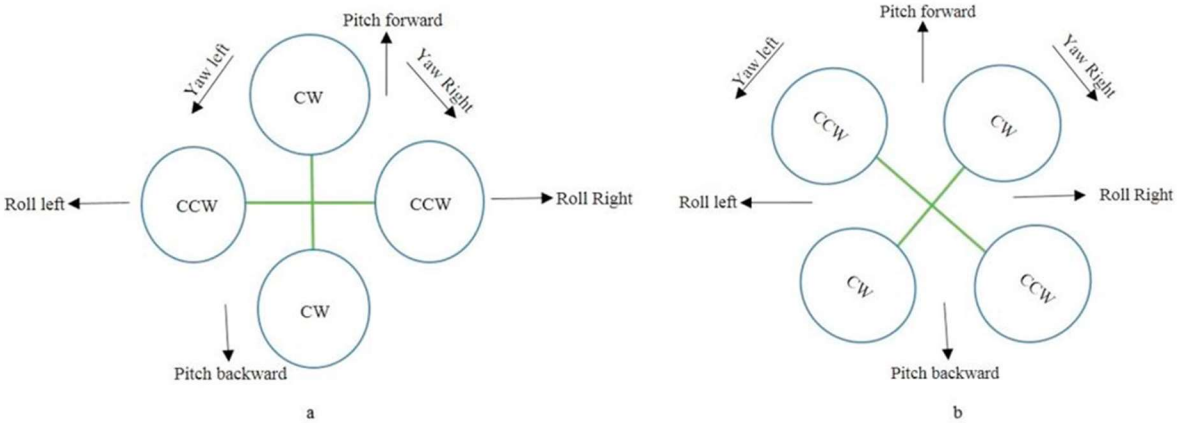
Şekil 2. İHA Tipleri a) Altı Rotorlu (hexacopter) b) Geniş Sabit Kanatlı c) Dikey Kalkış ve İnişli d) Dört Rotorlu (quadcopter) e) Mini Sabit Kanatlı f) Geniş Dikey Kalkış ve İnişli [13]

Genellikle sabit kanatlı İHA'lar, daha iyi haritalama ve yüksekten gözetleme için yüksek çözünürlüklü kameralarla kullanılmaktadır. Ayrıca mimarisi ve uçuş sistemi basittir. Ancak kalkış ve iniş için bir piste veya fırlatma rampasına ihtiyaç duymaları dezavantajıdır [12].

Diğer taraftan, döner kanatlı İHA'lar, dikey kalkış ve iniş yapabildiğinden pist ve fırlatma rampasına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Dikey iniş kalkış yapabilme yeteneği, özellikle dik ve engebeli arazi çalışmalarında avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, düşük irtifa ve hızlarda uçma yeteneği, uzun süre aynı konumda kalabilme özellikleri de sabit kanat İHA'lara göre daha hassas çözünürlükte veri elde edilmesini sağlamaktadır.

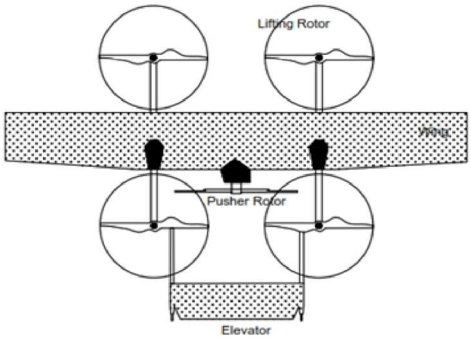
Döner kanatlı İHA'ların, Şekil 2'de gösterildiği gibi tek rotorlu, dört rotorlu (quadcopter)'nun, yanında altı veya sekiz rotorlu (sırasıyla hexacopters ve octocopters) yapıları da mevcuttur. Rotor sayısının artması daha düşük titreşim ve daha yüksek uçuş stabilitesi sağlamaktadır. Hexacopter ve octocopterler ile yapılan çalışmalar, quadcopter'lere göre son zamanlarda daha fazla ilgi görmektedir [13, 14].

İHA'larda itme gücü pervaneler tarafından üretilmektedir. Şekil 3'te quadcopter için iki farklı konfigürasyon gösterilmekte olup, dört pervanenin ikisi karşılıklı olarak saat yönünde dönerken (CW), diğer ikisi saat yönünün tersinde dönmektedir (CCW). Quadcopter'ın eksen etrafındaki hareketi, pitch (geriye ve öne), roll (sağa ve sola) ve yaw (saat yönünde ve saat yönünün tersinde) hareketlerini içermektedir [15].



Şekil 3. Quadcopter konfigürasyonları a) Artı (Plus) b) Çapraz (Cross) [15]

Bunun yanında, sabit ve döner kanat İHA'ların avantajlarını birleştirip, dezavantajlarını azaltmak için hibrit modeller üzerine çalışmalar yapılmaktadır [12]. Böylece, sabit kanatlı İHA'nın uçuş kabiliyeti, döner kanatlı İHA'ların dikey iniş kalkış kabiliyetleri bir arada kullanılabilmektedir. (Şekil 4) Hibrit İHA'lar hem dayanıklılık hem de yüksek manevra kabiliyeti gerektiren görevler için idealdir. Uçuş sırasında döner kanatlı ve sabit kanatlı iki mod arasındaki geçiş yapabilen tilt-rotor tipleri de mevcuttur [16].



Şekil 4. Hibrit İHA'nın üstten görünüşü [12]

Her İHA tipinin, kontrol sistemi karmaşıklığı, itki sistemi, güç sistemi (elektrik ya da diğer motor tipleri), maliyeti farklılıklar gösterebilmektedir. İtki sistemi için gerekli motor sayısı bakımında döner kanat İHA'lar güç tüketimi nedeniyle dezavantajlı olduğu söylenebilir. Bu durum, havada kalma süresini doğrudan etkilediğinden uygulamaya yönelik İHA seçiminde belirleyicidir. Hibrit İHA'lar, döner kanat İHA'lar gibi dikey iniş kalkış yapabilen ve itki sistemleri için gerekli gücü bataryadan sağlayan, ayrıca sabit kanatın kanat yüzey avantajına sahiptir. Yapısındaki sabit kanat yüzeyi sayesinde gerektiğinde fotovoltaik enerji kaynaklarından faydalanmak mümkün olabilmektedir. Bu sayede sağlanan ek güç kaynağı ile uçuş süresi ve irtifasını artırabilmektedir [22]. İHA'lar uzaktan kumanda ile pilotaj yapılarak ya da tamamen otonom olarak çalıştırılabilirler. Bu durum da yapılacak uygulamaya bağlı olarak İHA tipinin seçimi önemlidir. Kontrol edilebilirlik açısından, döner kanat İHA'lar, sabit ve hibrit tiplere göre daha avantajlıdır.

III. İHA KULLANIMINDA OTORİTELER

Ülkemizde Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal Aviation Administration (FAA) ve Avrupa Birliği içerisinde European Aviation and Safety Agency (EASA) kuruluşları hava araçları, uçuş emniyeti gibi tüm konularda karar verici ve uygulayıcı kurumlardır. Günümüz teknolojisi ile gelişen İnsansız Hava Araçları, havacılık sektörü için uçuş emniyetini ve güvenliğini sağlamak önem arz etmektedir. Bu yüzden İnsansız Hava Araçlarının da özel kategoride değerlendirilip kurallar ve izinlere bağlanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle havadaki ve yerdeki risk değerlendirmeleri yapılmalıdır. Bu değerlendirmeler için genellikle Özel Operasyon Risk Değerlendirmesi (SORA) modeli kullanılmaktadır [17].

EASA belirlediği üç faaliyet alanına bağlı olarak İHA sistemleri için gerekli izinleri ve yetkinlikleri kontrolünü sağlamaktadır. Risk düzeyi kriterlerinin yanı sıra bazı diğer kriterler de göz önünde bulundurularak üç faaliyet kategorisi oluşturulmuştur. 'Açık' kategorideki İHA sistemi operasyonları, önceden herhangi bir operasyonel izne veya operasyon gerçekleşmeden önce İHA sistemi operatörünün/işleticisinin yapacağı operasyonel beyana tabi değildir. 'Belirli' kategorideki operasyonlar, yetkili otorite tarafından verilen bir operasyonel yetkilendirmeyi veya tanımlanan koşullar altında, bir İHA sistemi operatörü/işleticisi tarafından yapılacaktır. 'Sertifikalı' kategorisindeki operasyonlar ise İHA sisteminin ve operatörün sertifikasyonunu ve uygun olduğu durumlarda İHA pilot lisansını gerektirmektedir. Bu kategorilerin yanı sıra İHA sisteminin kullanan operatör tecrübesi, İHA'nın ağırlığı ve teknik özellikleri de kurallar çerçevesinde değerlendirilmiştir [17]. EASA'ya göre kalkış kütlesine göre sınıflandırma, C0 (250gr'a kadar) topluluk olmayan insan grupları üzerinden ya da insanlardan uzak alanda uçurulabilir, C1 (900gr'a kadar) C0 ile benzer ortamlarda uçurulabilir, C2 (4kg'a kadar) insanlara yakın veya uzak ortamlarda uçurulabilir, C3 ve C4 (25kg'a kadar) ise insanlardan uzakta uçurulmalıdır. C0 kategorinin dışında pilotaj yaş alt sınırı 16'dır ve işletici ya da pilot bilgilerinin otoriteye kayıtlı olması gereklidir.

Türk sivil havacılık otoritesi SHGM (Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü), diğer otoritere benzer olarak kullanım amaçlarına ve azami kalkış ağırlıklarına göre gereklilikleri belirtmiştir. İHA 0 (250 g- 4 kg'a kadar), İHA 1 (4 kg- 25 kg'a kadar), İHA 2 (25 kg- 150 kg'a kadar) ve İHA 3 (150 kg'dan fazla) olarak [24]. Donanım seviyesi ve kalkış ağırlığı bakımından tarım uygulamalarında genellikle İHA 1 ve üzeri kategoriler kullanıldığından yetkili bir kuruluştan eğitim almış ve pilot lisansına sahip biri tarafından kullanılmalı ve ayrıca uçurulacak alanın havacılık açısından durumuna göre çeşitli sensörler kullanılarak yapılan hastalık teşhisi, sulama, ilaçlama vb. uygulamalar için SHGM'den özel izin alınması gerekmektedir.

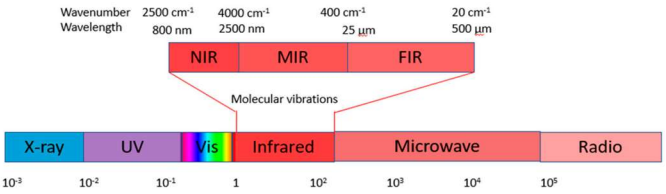
IV. İHA TARIM UYGULAMALARINDA KULLANILAN SENSÖRLER

İHA'ların tarımda kullanılmasının temel avantajı faydalı yük taşıyabilme kapasiteleridir. Bu sayede sulama, ilaçlama gibi yüksek ağırlıklı donanım taşımanın yanında, görüntüleme sistemleri gibi hassas ama daha hafif cihazlar da taşıyabilmektedir.

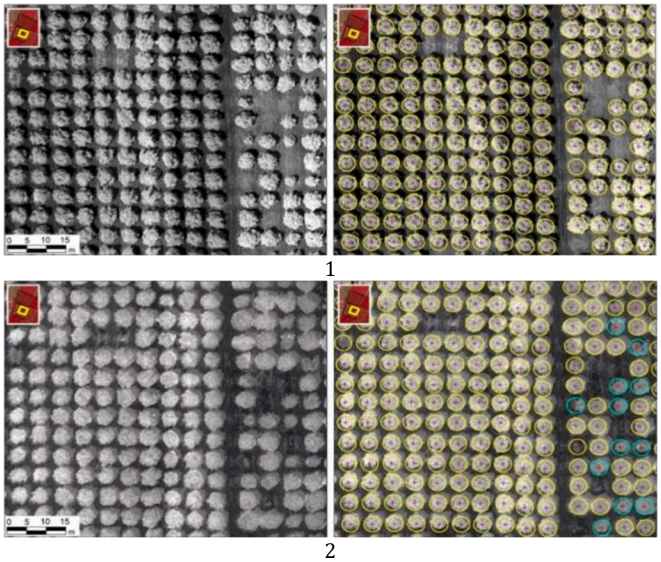
İHA'lar ile yapılan tarımsal faaliyetlerde; ortomozaik haritaların oluşturulması, NDVI indeksi türetilmesi, bitki özellikleri hakkında bilgi edinilmesi, bitki hastalık ve zararlılarının tespit edilmesi, nem tahmininin yapılması, ürün su stresinin izlenmesi, 3D modelleme yapılması, arazilerin sınıflandırılması, bitki gelişiminin izlenmesi gibi bilgilerinin elde edilmesi için çeşitli kamera ve sensörler kullanılabilmektedir.

Sensörler pasif ve aktif olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Pasif sensörler genellikle tarımda kullanılan en yaygın tiptir ve nesnelerden yansıyan ya da yayılan enerjiyi ölçmektedir. Aktif sensörler ayrıca enerji yayar ve yayılan bu enerjinin yansımasını da algılayabilmektedirler [5]. Bunların dışında İHA'larda sıcaklık, basınç, rüzgâr, nem gibi atmosferik sensörler, ultrason, kızılötesi, radyo frekansı, GPS gibi konum sensörleri vb. sensörler kullanılabilmektedir [18].

RGB sensör, görüntüyü 400 –700nm dalga boylu RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) renklerin göründüğü şekilde yakalamaktadır. RGB sensörler ile tek bir örnekte tüm alanın görüntüleri ve hava videolarının yakalandığı ortomozaik haritalar oluşturularak daha hızlı gözlemleme sağlanabilmektedir. [3]. RGB kameralar, yer örnekleri ile doğrulama ve konumlama yapabilmek için yer yüzeyinin gerçek görüntülerini oluşturmaktadırlar. RGB filmler kullanılarak 10 cm'ye kadar yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilmektedir [5, 19]. Bitki örtüsü stresi, klorofil içeriği vb. bitki özellikleri hakkında bilgi toplamak için Yakın Kızılötesi- Near Infrared (NIR) kullanılmaktadır. Şekil 5'te gösterilen NIR'ın dar bir aralığı olan kırmızı kenar (yaklaşık 680-730 nm) kullanılarak çeşitli indeksler elde edilebilmektedir. NIR sensörler tarımsal amaçla, Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Yeşil Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (GNDVI), Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI), Foto Kimyasal Yansıma İndeksi (PRI) ve Modifiye edilmiş yeşil-kırmızı bant indeksi MGRVI gibi Bitki İndekslerini türetmek için kullanılabilmektedir [18, 20, 21].



Şekil 5. Elektromanyetik Spektrumda NIR, MIR ve FIR Dalga Boyu Aralığı [20]



1

2

Şekil 6. 1-NIR Bant Görüntü 2- NDVI indeksi görüntü [21]

Multispektral sensörler, tipik olarak görüntülenen alanın spektral yansımasını yakalamak için kullanılmaktadır. Bu sensörler, birkaç spektral bant (kırmızı, mavi, yeşil ve NIR gibi) ile yüksek uzamsal çözünürlükte optiksel veri oluşturabilirler. İHA ile kullanılan en yaygın sensörlerden biri olan multispektral sensörler tarımda bitki gelişiminin takibi, ürün sağlığı analizinin yapılması, vejetatif biyokütlenin hesaplanması, bitki hastalıkların tespiti ile yabani otların erken tespitinde kullanılabilmektedir [18, 19].

Hiperspektral Sensörler (HSI), yüksek uzamsal çözünürlükte optiksel veri oluşturabilirler. Yüksek güçlü İHA'lar ile mahsulleri o kadar yüksek hassasiyet ve doğrulukla izleme yapılabilmektedir ve tarladaki hastalıkları daha ilk aşamada tespit edip tanımlayarak verim kaybına karşı kolayca koruma sağlanabilmektedir. Ayrıca bu sensörler tarımda lezyon tespiti, nem tahmini, asitlik seviyelerinin tahmin edilmesi, toprak yapısının belirlenmesi ve toprak kalitesinin değerlendirilmesi, alana özgü gübreleme ve bitki koruma uygulamalarında kullanılabilmektedir. Bu sensörler 200'den fazla spektral bandı (400-2500 nm) içerirler ve böylece daha yüksek çözünürlükte (5-10 nm) ve detaylı veriler üretebilmektedirler [18, 19]. Hiperspektral görüntüleme, süreklilik arz eden bir spektrum boyunca sinyaldeki ince farklara duyarlı uygulamalar için en uygunudur [23].

Nesneler tarafından yayılan kızılötesi radyasyonun algılanması ve sıcaklığın dijital bir radyometrik görüntüde gösterilmesi için termal sensörler, kullanılmaktadır. Tarımda bitki su stresi izleme, bitki hastalığı tespiti, fenotipleme ve bitki örtüsü durumu izleme amaçlarıyla kullanılmaktadır [18]. Bu sensörler ayrıca toprağın sıcaklığını ve mahsul durumlarını görüntülemede kullanılırlar. Böylece çiftçiler mahsullerin ihtiyaçlarına göre sulama planı yapabilirler. Bu tarz İHA'lar su israfını azaltmaya yardımcı olmaktadır [19]. Termal sensör uygulamasının bir örneği, çevresel etkilere maruz kalan hedef bitkilerin su stresini tahmin etmek için Mahsul Su Stresi İndeksi (CWSI) gibi bir indeksin kullanılmasıdır [33].

LiDAR (Light Detection and Ranging) verileri, normal hava görüntüleriyle, ilişkili görüntü çakışması gereksinimi olmadan topografya verileri sağlamada mükemmeldir ve böylece topografik haritalama verimliliğini artırır [5]. LiDAR ile bitki tanımlama ve tespiti, yeşil alan indeksi, bitki büyüme değişkenliğinin belirlenmesi, ürün gelişiminin takibi, konumların belirlenmesi, 3D modelleme, toprak yüzey pürüzlülüğünün tahmini, otonom tarım araçlarının kontrolü, kanopi hacmi belirleme, arazi sınıflandırması gibi tarımsal uygulamalar yapılabilmektedir. Yapay Açıklıklı Radarlar (SAR) yüksek çözünürlüklü yeryüzünü görüntüleme ve hareketli alan tespitli bir radar sistemidir. SAR sistemlerinin diğer görüntüleme sistemlerine göre en önemli avantajı mikrodalga frekanslarında çalışmasıdır. Böylece her türlü hava koşullarında, aydınlatma kaynağını kendi sağlayıp gece/gündüz yüzeyin elektriksel ve geometrik özelliklerini gösteren bir görüntüleme sağlamaktadır. Hassas tarım uygulamalarında yapılan toprak nemi değişkenliğinin haritalanması, yabancı otların tespit edilmesi, bitki gelişimlerinin izlenmesi, verimliliğin tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir [18].

Yukarıda bahsedilen kamera ve sensörler Tablo 2'de tipleri ve ağırlıklarıyla beraber özetlenmiştir [18].

Tablo 2. İHA'lar da Kullanılan Hassas Tarımda Kullanılan Sensörler ve Özellikleri [18]

Sensörler	Sensör Tipi	Spektral Çözünürlük	Ağırlık
Görünür RGB	Pasif	Düşük (3 bant)	Düşük <0,5 kg
Yakın Kızılötesi (NIR)	Pasif	Düşük (3 bant)	Düşük <0,5 kg
Multispektral	Pasif	Orta (5–12 bant)	Orta 0,5–1 kg
Hiperspektral	Pasif	Yüksek (> 50–100 bant)	Orta 0,5–1 kg
Termal	Pasif	Düşük (1 bant)	Orta 0,5–1 kg
Lazer tarayıcılar (LiDAR)	Aktif	Düşük (1-2 bant)	Yüksek 0,5–5 kg
Sentetik Açıklıklı Radarlar (SAR)	Aktif	Düşük (3 bant)	Yüksek >5 kg

V. HASSAS TARIM UYGULAMALARINDA İHA KULLANIMI

Hassas tarım, doğru zamanda ve doğru konuma uygun yöntemleri kullanarak gübreleme ve ilaçlama gibi tarımsal uygulamaların daha iyi yönetilmesini de içermektedir. Tablo 3'te İHA ile yapılabilen hassas tarım uygulamalarından bazıları verilmektedir [21].

Tablo 3. Hassas Tarım Uygulamaları

Zirai İlaçlama	Su Stresi Ölçümleri
Toprak Yapısına Göre Ekim	Klorofil ve Nitrojen Yoğunluk Ölçümleri
Bitki Sulama Planlaması	Yabancı Ot ve Haşere Tespiti
Biyokütle Çıkarımı	Mineral Eksikliği Teşhisi
Bitki Boyu Ölçümleri	Toplam Ürün (Rekolte) Tahmini / Verim
Toprak Nem ve Sıcaklık Ölçümleri	Bitki Sınıflandırma ve Gelişim İzleme
Harita Oluşturma	Seracılık
Hastalık Teşhisi	Bitki/Ağaç Sayımı
Çiftlik Hayvanları Uygulamaları	Ormancılık Uygulamaları

M. Akkamış ve arkadaşlarının (2020) çalışmasından, bitki koruma çalışmalarında kullanılan İHA'ların traktörle yapılan geleneksel ilaçlama yöntemlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya göre İHA'ların traktöre göre düşük yakıt tüketimi, daha verimli çalışma, daha az kimyasal uygulanması, düşük gürültü, operatörün kimyasaldan etkilenmemesi, düşük püskürtme oranı gibi bazı avantajlarının yanında rüzgârın belli bir değerden yüksek olmasından dolayı kimyasalların sürüklenmesi, küçük ve yüksek engellere sahip arazilerde uygulama yapılmasının zorluğu, çok büyük arazilerde İHA uçuş süresi nedeniyle birkaç defa uçuş yapılma gerekliliği gibi durumlar da tespit edilmiştir [28].

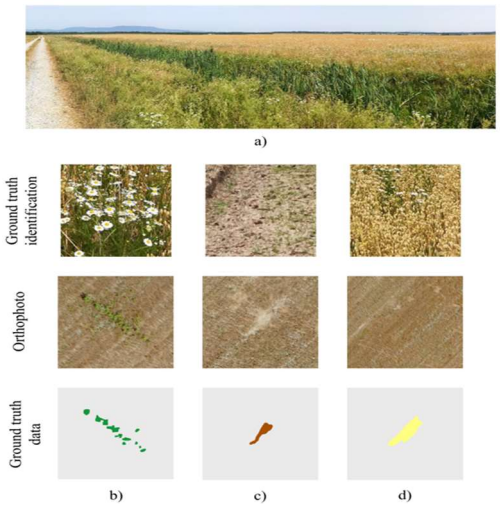
Hızlı ve hassasiyeti yüksek ölçü yapabilme imkânı veren İHA ile uzaktan görüntüleme yaygınlaşmaktadır [2]. Tarım uygulamalarında quadcopter tipi İHA kullanımı yaygındır. Bu tip hava araçları çoğunlukla bataryadan alınan elektrik gücü ile çalışan itki sistemleri sayesinde hareket etmektedir. Bataryadan güç sağlandığından, itki için kullanılan motor sayısı ve ağırlık önemli iki unsurdur.

P. Garre vd., (2018) 12 kg yük kapasiteli quadcopter İHA ile GPS ve Wi-fi sensörleri kullanarak mahsullerin zirai ilaçlaması üzerine çalışma yapmışlardır. Uzaktan kumandalı ya da otonom kontrol ile, sensörlerden gelen verileri gerçek zamanlı kullanarak ve hassas tarım yapılabileceğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada, konum bilgisinin yanında rüzgâr gibi püskürtmenin hedefe ulaşmasını engelleyen değişkenlerin de ölçümünü gerçek zamanlı veri için kullanmışlardır [6]. D. Yallappa vd., ilaçlama için batarya güç kaynağı kullanan 5 kg yük kapasiteli uzaktan kontrollü hexacopter, İHA geliştirmişlerdir. Geliştirilen İHA ile 15dk havada kalarak hem laboratuvar koşullarında hem de açık çeltik ve yer fıstığı tarlaları üzerinde denemeler yapılmıştır. Kimyasalların damlacık boyutu ve yoğunluğu, kimyasal sıvı kaybı, püskürtme bütünlüğü gibi verilerin kıyaslaması yapılmıştır. Sonuçlarında yer altı mahsullerinin de insan müdahalesi olmadan verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuşlardır [7].

C. Dönmez vd., güç kaynağı olarak batarya kullanan, octocopter İHA 25 dakikalık uçuş yaparak multispektral kamera ve Connected Component Labelling (CCL) metodu kullanarak, NDVI görüntü ve farklı spektral bantlarda ortofoto görüntü oluşturmuşlardır. İHA sayesinde alınan hassas görüntüler ile CCL metodunda elde edilen ağaç sayısının gerçekte olan ağaç sayısına göre yüksek doğrulukta değerler elde edildiğini göstermişlerdir [34]. H. Durgun vd., yine batarya ile güç sağlayan Quadcopter kullanarak 21 dakikaya kadar uçuş süresi ile yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. GPS sensörü ve elde edilen görüntülerden, kesilmiş kızılçam ağaçlarının göğüs çapı ve boylarının ölçümü çalışması yapılmıştır. Elde edilen değerlerden farklı yöntemlerle hacim tahminleri yapılmış ve sonuçlar arazi ölçümleriyle karşılaştırılarak başarılı sonuç elde edilebileceği ortaya konulmuştur [25].

Z. Altaş vd. 23dk süreli uçuşlar yaparak GPS ve ultrasonik sensör donanımlarına sahip quadcopter İHA ile elde edilen görüntüler işlenerek MATLAB ortamında yaprak lekesi hastalığının tespit ederek hastalık seviyelendirmesini gerçekleştirmişlerdir aynı zamanda seviyelendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda düşük hata yüzdeleri ile hastalığın tespiti sağlanmıştır [26].

J. Su vd., octocopter ile 15 dk kadar havada kalarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Multispektral kamera ile alınan görüntüler, MATLAB ortamında tanımlama ile kışlık buğdaylardaki sarı pas hastalığının tespitine başarılı olmuşlardır [27]. M. Gašparović vd., GNSSS sensörü kullanan sabit kanatlı İHA ile görüntüler elde edilmiş spektral indeksler kullanarak yabancı ot tespiti ve sınıflandırması yapılmıştır [29]. A. Mateen vd., ortalama 20 dk uçuş süreli quadcopter İHA ile NIR ve RGB sensörlerini kullanarak elde edilmiş görüntülerden, MATLAB ile yapılan indeks hesaplamalarıyla buğday tarlasındaki yabancı otların tespiti yapılmıştır. [32].



Şekil 7. b) Yabancı Ot, c) Kuru Toprak, d) Buğdaylar [29]

Y. Doğan ve arkadaşı, çalışmalarında quadcopter İHA kullanarak araziden aldıkları multispektral görüntüleri çeşitli yazılımlarda işleyerek üç farklı algoritma ile sınıflandırılmıştır [30]. S. Saeed vd., 27 dakika havada kalabilen quadcopter İHA ile multispektral kamera ve NDVI indeks hesaplamaları yaparak 17 farklı bitki sınıflandırılmıştır [31].

Bahsedilen tarım uygulamalarında görüldüğü üzere çoğunlukla 25 kg ve üzeri azami kalkış ağırlığı olan İHA'lar kullanılmıştır. Ayrıca, bu uygulamaların tamamında itki ve diğer sistemlere güç sağlanabilmesi için batarya kullanılmaktadır. Güç kaynağı olarak batarya kullanımı havada kalma süresi açısından kısıt oluşturmaktadır. Genellikle boyut ve anlık yüksek güç sağlayabilme avantajı sağladığından Lithium Polimer (Li-Po) bataryalar kullanılmaktadır. Ölçüm ya da görüntüleme hassasiyeti ve doğruluğu için altı ya da sekiz rotorlu İHA'lar kullanıldığında havada kalma süresi azalmaktadır. Bununla beraber, sabit kanatlı İHA bu konuda avantaj sağlayarak uzun süreli uçuş yapabilmektedir. İHA üzerindeki itki sistemlerine ek olarak, faydalı yük olarak kullanılan sensörler ya da püskürtme sistemleri enerji ihtiyacını arttırabilmektedir. Buna göre, İHA'larda enerji yönetimini desteklemek için uçuş esnasında alternatif güç kaynakları kullanabilmek faydalı olacaktır. Hibrit İHA'lar, hassas ölçüm avantajının yanında, kanat yapısı ile fotovoltaik enerji desteği avantajı da sunabilmektedir [22]. Bu sayede, batarya ve fotovoltaik hücreden elde edilen güç, enerji yönetim sistemleri ile kontrol edilerek uçuş süresinin uzatılabilmesi ile sonuçlanmaktadır.

VI. SONUÇLAR

Dünya nüfusunun hızlı artışına paralel olarak tarımın ve besin üretiminin önemi her geçen gün artmaktadır. Tarım alanlarının daha verimli kullanılabilmesi için gelişmiş teknolojik cihazların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Özellikle savunma sanayi sistemlerinde karşımıza çıkan İHA'lar, akıllı cihazların kullanıldığı hassas tarım uygulamalarında da kullanılmaktadır. İHA'lar, faydalı yük taşıyabilmeleri, donatıldıkları sensörler ile gerçek zamanlı izleme yapabilmeleri gibi avantajlar sunabilmektedir.

Bununla beraber, bir hava aracı olduğundan, kullanıcılar havacılık otoritelerinin kuralları doğrultusunda hareket etmelidirler. Bu durum, kullanıcıların İHA azami kalkış ağırlığına bağlı olarak yetkili bir kuruluştan İHA pilotaj eğitimi alması gibi gerekliliklerin yerine getirilmesi zorunlu hale gelmektedir. İHA kullanımı konusundaki ülkemizdeki yasal gereklilikler, bazı farklılıklarla birlikte nispeten dünyadaki önemli otoritelerle paralel bir şekilde düzenlenmektedir.

Bu çalışmada, hassas tarım uygulamaları alanında İHA kullanımı konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş, gelişmiş tarım uygulamaları içerisinde İHA'ların bazı dezavantajlarına rağmen insan gücü ve maliyetleri azaltacak bir yöntem olması nedeniyle bu alandaki konum algılamayı da kullanarak çeşitli görüntü işleme teknikleri vb. kullanılarak yapılan hassas tarım uygulamaları üzerine yapılan çalışmaları daha da arttıracağı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, yüksek rotor sayısını titreşim ve kararlılık üzerine pozitif etkisi olduğundan hexacopter ve octocopterler kullanılarak bu alanda yapılan çalışmaların artması beklenmektedir. Bu çalışmalarda kullanılan cihazların enerji tüketimi konusunda bir değerlendirme yapıldığında özellikle batarya ile hareket eden sistemler için itki sistemlerinin yanında diğer cihazların da enerji tüketimleri hem ağırlık hem de enerji yönetimi açısından önem arz ettiği görülmektedir Buna göre, hassas tarım uygulamalarında İHA'ların daha fazla kullanılabilmesi için enerji yönetim sistemleri üzerine de daha birçok araştırmanın yapılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Declaration of the world summit on food security," pp. 1–7, 2009.

[2] D. C. Tsouros, A. Triantafyllou, S. Bibi, P. G. Sarigannidis, "Data acquisition and analysis methods in UAV-based applications for Precision Agriculture", in 15th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2019.

[3] B. S. Banu, "Precision Agriculture: Tomorrow's Technology for Today's Farmer", *Journal of Food Process Technology*, 6(8), 2015.

[4] Mulla D. J., "Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps," *Biosystems engineering*, 114(4), 358–371, 2013.

[5] D. Merwea, D. R. Burchfieldb, T. D. Wittb, K. P. Pricec, A. Sharda, "IHAs in agriculture", *Advances in Agronomy*, 162, 2020.

[6] P. Garre, and A. Harish, "Autonomous Agricultural Pesticide Spraying UAV", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 455(1), 2018.

[7] D. Yallappa, M. Veerangouda, D. Maski, V. Palled and M. Bheemanna, "Development and Evaluation of İHA Mounted Sprayer for Pesticide Applications to Crops", *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2017.

[8] M. F. F. Rahman, S. Fan, Y. Zhang, and L. Chen, "A Comparative Study on Application of Unmanned Aerial Vehicle Systems in Agriculture", *Agriculture*, 11(1), 22, 2021.

[9] K. Chiranjeeb, R. Shandilya, and K. C. Rath, "Application of İHAs and Sensors in Advanced Farming: The Future Smart Farming Technology." *Artificial Intelligence and Smart Agriculture*, 2023.

[10] G. Radhakrishnan, P. R. Somannavar, R. Nagamani, and K. Thangaraj, "A Review of Deep Learning-Based Techniques for Agricultural Disease Detection Using Unmanned Aerial Vehicles", *İHAs*, 7(6), 2023.

[11] W. W. Verboom, S. D'Agostino, M. von Cossel, C. Solignac, L. Paglierani, vd. "A Framework for Identifying Insect Pest Species in Vineyards Using Deep Learning and Laser Speckle Contrast Imaging" *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 106791, 2023.

[12] P. Velusamy, S. Rajendran, R. K. Mahendran, S. Naseer, M. Shafiq, J.-G. Choi, "Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges", *Energies*, 15, 217, 2022.
[13] N. Delavarpour, C. Koparan, J. Nowatzki, S. Bajwa, X. Sun, "A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges", *Remote Sensing*, 13, 1204, 2021.
[14] V. Singh, A. Rana, M. Bishop, A. M. Filippi, D. Cope, N. Rajan, and M Bagavathiannan, "Unmanned aircraft systems for precision weed detection and management: Prospects and challenges", *Advances in Agronomy*, 159, 2020.
[15] U. R. Mogili, and B. B. V. L. Deepak, "Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture", *Procedia Computer Science,* 133, 502-509, 2018.
[16] E. Ayyildiz, "İnsansız Hava Araçlarının Kadastro Çalışmalarında Kullanımı", *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(1), 29–32, 2020.
[17] Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems, EASA website, 2022, https://www.easa.europa.eu/en.
[18] M. M. Özgüven, Z. Altaş, D. Güven ve A. Çam, "Tarımda İHA Kullanımı ve Geleceği", *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 64-83, 2022.
[19] R. Tyagi, and P. C. Pandey, "Applications of IHA in Precision Agriculture: Future of Smart and Sustainable Farming." *Remote Sensing in Precision Agriculture*, 2024.
[20] G. Fox, "The Brewing Industry and the Opportunities for Real-Time Quality Analysis Using Infrared Spectroscopy" *Appl. Sci*, 10, 616, 2020.
[21] O. Villi, and M. Yakar, "İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri", *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73-100, 2022.
[22] K. Mateja, W. Skarka, M. Peciak, R. Niestrój, M. Gude, "Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV", *Energies,* 16, 479, 2023.
[23] Hyperspectral and Multispectral Imaging Available: https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/hyperspectral-and-multispectral-imaging/ (2024).
[24] İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı (SHT-İHA), Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü web sitesi, https://web.shgm.gov.tr/
[25] H. Durgun, H.O. Çoban, M. Eker, "İnsansız Hava Aracıyla Elde Edilen Hava Fotoğraflarından Kızılçam Ağaçlarının Çap Ve Boylarının Ölçümü Ve Gövde Hacminin Tahmini", *Turkish Journal of Forestry*, 23(4), 255-267, 2022.
[26] Z. Altas, M. M. Özguven, Y. Yanar, "Determination of Sugar Beet Leaf Spot Disease Level (Cercospora Beticola Sacc.) with Image Processing Technique by Using Drone", *Current Investigations in Agriculture and Current Research*, 5(3), 621-631, 2018.
[27] J. Su, C. Liu, M. Coombes, X. Hu, C. Wang, X. Xu, Q. Li, L. Guo, W.-H. Chen, "Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery", *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 157–166, 2018.
[28] M. Akkamış, S. Çalışkan, "İnsansız Hava Araçları ve Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı", *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 8–16, 2020.
[29] M. Gašparović, M. Zrinjski, Đ. Barković, D. Radočaj, "An automatic method for weed mapping in oat fields based on UAV imagery", *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105385, 2020.
[30] Y. Doğan, F. Yıldız, "İHA İle Multispektral Kameralardan Sağlanan Görüntüler Yardımıyla Bitkİ Türlerinin Sınıflandırılması", *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2019.
[31] S. Saeed, M. A. Latif, M. A. Rajput, Fuzzy-Based Multi-Crop Classification Using High Resolution UAV Imagery. "Quest Research Journal", 19(1), 2021.
[32] G. Jang, J. Kim, J-K. Yu, H-J. Kim, Y. Kim, D-W. Kim, K-H. Kim, C. W. Lee, Y. S. Chung, "Review: Cost-Effective Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Field Plant Breeding Application", *Remote Sens.*, 12, 998, 2020.
[33] A. Mateen, Q. Zhu, "Weed Detection in Wheat Crop Using UAV For Precision Agriculture", *Pak. J. Agri. Sci.*, 56(3), 775-784. 2019.
[34] C. Dönmez, O. Villi, S. Berberoğlu, A. Çilek, "Computer vision-based citrus tree detection in a cultivated environment using UAV imagery", *Computers and Electronics In Agriculture*, 187, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Dynamic Analysis of Surface Sloshing of Open Irrigation Channels under Earthquake Effects

Muhammet Ensar YİĞİT [a], Ecem TUNCER UYSAL [b]*

[a, b] Manisa Celal Bayar University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Civil Engineering Department, Manisa/Türkiye
* **Corresponding author:** ensar.yigit@cbu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, seismic responses have been thoroughly investigated by creating empty and full models of a main irrigation channel. There are not a sufficient number of studies in today's literature regarding the analysis of main channel sloshing. To better understand fluid-structure interaction, empty and full models of the main channel are compared. Dynamic analyses of these models are conducted using the records of the Pazarcık/Kahramanmaraş earthquake in 2023. During the analyses, fluid-structure interaction is modeled using the combined Eulerian-Lagrangian approach, and fluctuations in the water are carefully monitored throughout the process. As a result of the analyses, the movement of the water mass and potential overflow are observed in detail. In the case of the main channel being full, a significant increase in relative displacements is observed. Additionally, a decrease in damping effects and tensile stresses due to liquid weight (S_{max}), along with an increase in pressure stresses (S_{min}), are noted. In both models, the largest principal pressure stresses and tensile stresses are concentrated in an area close to the base, where damage from earthquakes is typically expected. These analyses underscore the importance of considering fluid-structure interaction in order to anticipate potential floods and damage on the channel.

Keywords: *Fluid mechanics, Fluid-structure interaction, Hydromechanics, Open irrigation channels*.

Açık Sulama Kanalların Deprem Etkisinde Yüzey Çalkantısının Dinamik Analizi

ÖZET

Bu araştırma kapsamında, bir ana sulama kanalının boş ve dolu modelleri oluşturularak sismik tepkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Günümüz literatüründe, ana kanal çalkantı analizi konusunda yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Akışkan-yapı etkileşimini daha iyi anlayabilmek adına, ana kanalın boş ve dolu modelleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. 2023 yılında yaşanan Pazarcık/Kahramanmaraş depremi kayıtları kullanılarak, bu modellerin dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında, birleşik Eulerian-Lagrangian yaklaşımı ile akışkan-yapı etkileşimi detaylı bir şekilde modellemiştir ve süreç boyunca suyun çalkantıları dikkatle izlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde, su kütlesinin hareketi ve potansiyel taşmalar detaylı bir biçimde gözlemlenmiştir. Ana kanalın dolu olması durumunda, göreceli yer değiştirmelerde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, sönümleme etkisi ve sıvı ağırlığına bağlı çekme gerilmelerinde (S_{max}) bir azalma, basınç gerilmelerinde (S_{min}) ise bir artış gözlenmiştir. Her iki modelde de en büyük asal basınç gerilmeleri ve en büyük asal çekme gerilmeleri genellikle depremlerde hasar görmesi beklenen tabana yakın bir alanda yoğunlaşmıştır. Bu analizler, olası taşkınları ve kanal üzerinde meydana gelebilecek hasarları öngörebilmek adına akışkan-yapı etkileşiminin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Açık sulama kanalları, Akışkanlar mekaniği, Akışkan-yapı etkileşimi, Hidromekanik.*

I. INTRODUCTION

The agricultural sector plays a significant role in the region's economic and social development, and agriculture is a vital part of the region's cultural and historic fabric. However, when natural disasters such as earthquakes occur, the structures and infrastructure related to this industry are often destroyed. Various collapses and structural damages occur in these channels due to the impact of earthquakes. Nevertheless, systematic research aimed at improving the seismic performance and behaviour of these channels is insufficient (Figure 1). A deeper understanding of the dynamic behaviours of main irrigation channels is critically important for the safety and durability of these structures. Therefore, further research and efforts are needed to reduce seismic risks and strengthen agricultural infrastructure.



a) b)

Figure 1. The examples of open channels a) Mardin Plain [1], b) Ceylanpınar Open Channel [2].

Main irrigation channels are required to have high flow rates to convey the necessary water for irrigation to distant areas. Additionally, it is important for these channels to be economical during construction; therefore, they are generally designed and built in the form of open channels. However, the structural design of such open channels is highly sensitive to dynamic effects. Upon examining the damage incurred by open channels during earthquakes, as depicted in Figure 2, it is often observed that effects such as sediment landslides, slope landslides, or ground slippage occur. Such natural events can impact the durability and safety of open channels, posing significant concerns for the reliability of agricultural irrigation systems.



a) b)

Figure 2. The damage examples occurred in various irrigation channels,
a) Kılavuzlu Main Channel/ Aksaray [3], b) Balıkburnu/ Adıyaman [4].

The vulnerability of irrigation infrastructure to seismic events underscores the critical need for comprehensive research and analysis in this field. Main irrigation channels serve as lifelines for agricultural communities, delivering vital water resources to farmlands across vast territories. However, the structural integrity of these channels is often compromised during earthquakes, leading to disruptions in water supply and potential flooding. Despite their importance, there remains a notable gap in the literature regarding the seismic performance of main irrigation channels and the dynamic interactions between fluid flow and structural elements. Addressing this gap is essential for developing effective strategies to mitigate the impact of earthquakes on irrigation infrastructure and ensure the resilience of agricultural systems in earthquake-prone regions. This study aims to contribute to the growing body of knowledge in this area by conducting a detailed analysis of seismic responses in main irrigation channels under different operating conditions.

The following discourse presents insights derived from a contemporary review of literature regarding ongoing studies.

Ramamurthy at all (2013) examined sharp open-channel bend flows, simulations conducted using Fluent yielded the best results with the Reynolds Stress Model (RSM) and the Volume of Fluid (VOF) approach. These findings suggest that accurately representing counter-rotating secondary flow cells downstream of the bend requires both proper treatment of the channel free surface and a sloshing model capable of resolving sloshing anisotropy. As understood from this article, turbulent solutions are necessary in sharp-bend channels or at high velocities. Therefore, the characteristics of the main channel used in our study are generalizable based on literature knowledge, aiming to simplify the analysis [5].

Johnson and Cowen (2020) conclude that the vertical variation of sloshing intensity in open channel flows can be effectively described using universal exponential expressions. These expressions provide a reliable method for estimating sloshing intensity in open channels remotely, without the need for direct measurements. The use of remote estimation techniques can be beneficial in situations where direct measurements are challenging or impractical, such as in large-scale open channel systems. By understanding and quantifying sloshing intensity variations, researchers and engineers can better predict and manage flow dynamics in open channels, leading to improved design and operation of hydraulic structures [6].

Ferraro at all (2022) discusses the challenges in predicting flow evolution in open channel flows due to complex features and the importance of studying flow characteristics under controlled laboratory conditions. It emphasizes the significance of rough beds in engineering practice and sediment transport phenomena, and the use of mathematical tools like spectral analysis to analyse turbulent phenomena [7].

Guerin and Timothy (2023) derive mass, momentum, and energy equations for open channel flow by averaging their small-scale counterparts, clarifying the need for closure relations. The derived equations are Galilean invariant and can be used for systems such as pipe flow or shallow water equations, as well as for entropy generation analyses [8].

This study focuses on investigating the seismic response of a primary irrigation channel to fluid-structure interaction. The seismic behaviour of the main irrigation channel was thoroughly examined to enhance our understanding of fluid-structure interaction. Currently, there is a noticeable gap in the literature concerning the analysis of sloshing in main channels. This study aims to address this gap by conducting linear dynamic analyses of both empty and full models of the main channel, utilizing data from the Pazarcık/Maraş earthquake in 2023. The seismic analysis of the main channel employs a combined Eulerian-Lagrangian approach to accurately depict fluid-structure interaction [9]. The analysis involves closely monitoring fluctuations in water mass throughout the process to observe movements and potential overflow occurrences.

A thorough examination of the existing literature underscores the extensive scrutiny that researchers have directed toward the hydrostatic and hydrodynamic analyses of open channels, employing a diverse array of methodologies. Over the course of time, these structures have witnessed a degradation in their seismic responses, attributable to external factors. The amalgamated Eulerian-Lagrangian approach adeptly encapsulates fluid-structure interaction, thereby facilitating the observation of phenomena such as water agitation, potential overflow, and spillage within the channel—attributes absent in alternative acoustic element-structure interaction models. Furthermore, a material model, tailored to the specifications of selected open channel units, has been deployed. Subsequently, two distinctive models, in conjunction with their present conditions, have been subjected to analysis utilizing a record of destructive earthquakes, and the resultant insights are compared.

II. Material And Methods

Coupled Eulerian-Lagrangian Analysis for Open Channel-Fluid Interaction

The Eulerian-Lagrangian Coupled Approach provides a robust framework to investigate the intricate interactions within open channel, considering both the broader spatial context and the behavior of individual elements. This comprehensive analysis aids in making informed decisions regarding structure safety, structural integrity, and risk assessment. In the context of fluid dynamics and continuum mechanics, the Eulerian and Lagrangian descriptions are two fundamental approaches used to analyze the motion and behavior of materials.

In the Eulerian description, the focus is on specific points or regions in space, and equations are formulated based on the properties observed at these fixed spatial locations. The Eulerian approach tracks how properties (such as velocity, pressure, or temperature) change over time at these fixed points. In contrast, the Lagrangian description follows the motion of individual particles or elements of a material. Here, each particle is tracked as it moves through space and time. The equations are formulated based on the properties associated with each specific particle, considering its position and velocity at any given time.

The mathematical equations used in the analysis are clearly given in articles in the literature [10]-[14].

III. State Analysis

A. Main Channel Linear Analysis

In this study, a two-dimensional model is developed to investigate the sloshing occurring under seismic effects in the cross-section of the Upper Harran Plain Main Irrigation Channel, which was completed as part of the Southeastern Anatolia Project (GAP). With the Upper Harran Irrigation system, water with a flow rate of 200 m^3/s is taken from the Atatürk Dam Lake and conveyed to an agricultural area of 211,075 hectares in Şanlıurfa and Mardin. Through the project, the waters of the Euphrates meet the lands in Viranşehir, Ceylanpınar, Derik, Kızıltepe, and Nusaybin. The Upper Harran main channel, Turkey's largest water conveyance channel, has a base width of 20 meters and a height of 5.6 meters. The channel is lined with concrete using a slipform paving machine. The project involved a total excavation of 24 million cubic meters, 950,000 cubic meters of concrete, 20,000 tons of steel, and 4.5 million cubic meters of embankment [15].

In this study, macro modelling was performed. The main channel slope is 1.5, the shoulder width is 4 m, the water depth is 4.5 m, the base width is 20 m, the soil air gap is 1.1 m, and the concrete air gap is 0.7 m (Figure. 3).

B. Material Properties

The main channel lining is selected to be a 0.3 m thick concrete lining of C_{20} class. Linear material properties are assigned to the concrete. Mohr-Coulomb material properties are specified for the soil and the embankment. The mechanical properties for concrete, soil, embankment and fluid are obtained from sources cited in the literature (Table 1).

Table 1. The material properties of concrete, soil and embankment [16], [17], [18].

Material	Density (kg/m^3)	Elasticity Modulus (Mpa)	Poison's Ratio	Speed of Sound (m/s)	Dynamic Viscosity ($N.s/m^2$)
Concrete	2374	28000	0.2	-	-
Soil	2200	2400	0.23	-	-
Embankment	1950	600	0.3	-	-
Water	1000	-	-	1450	$1.002x10^{-3}$

C. The Main Channel Finite Element Model

The channel, soil, and water were modelled as three-dimensional solid models using the finite element method (FEM) in the Abaqus program [19]. For the concrete channel, soil, and fluid FEM creation, an eight-node reduced integration cubic element (C3D8R) type was employed. The mesh spacing for the channel's FEM analysis was selected as 0.30 m (Figure 3). The analysis results obtained using the specified mesh spacing are provided under the section titled 'Results'.

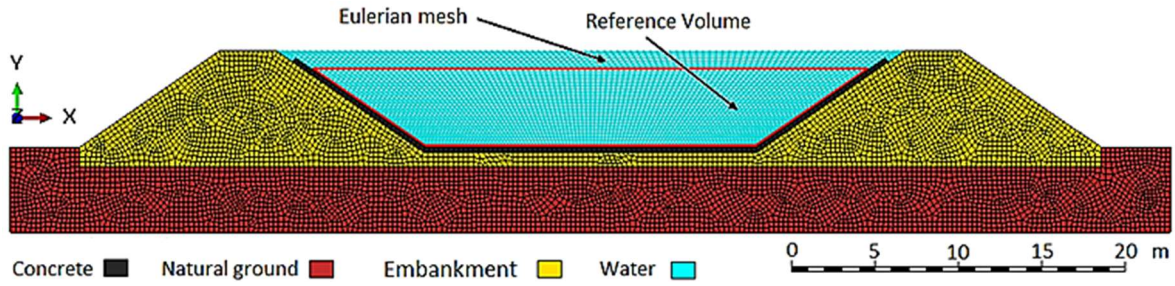


Figure 3. Three-dimensional solid model of the main channel and finite element mesh.

The model consists of 10,022 solid elements and 20,858 nodes. As boundary conditions, $U_2=0$ in the Y direction at the base, and U_1=acc(t) earthquake acceleration in the X direction are specified. Only U_1=acc(t) earthquake acceleration is applied in the X direction at the sides. The gravitational acceleration is entered as -9.81 m/s^2 in the Y direction.

D. Seismic Records

The ground motions associated with the main and aftershocks of the earthquakes in Kahramanmaraş on February 6, 2023, were recorded at numerous stations operated by AFAD. The latitude is 37.4851, longitude is 37.2978, Vs30 (m/s) is 671, soil class is ZC, effective duration E-W: 24.07 s, N-S: 23.16 s, U-D: 20.81 s, Distance (Repi): 61.30 km. The highest ground acceleration value of the Kahramanmaraş-Pazarcık earthquake with Mw=7.7 was recorded at station 4614 located in Pazarcık district of Kahramanmaraş

province, with a value of 2.005g in the East-West (E-W) component. The North-South (N-S) component was measured at 1.987g, while the vertical (U-D) component was measured at 1.379g. In this study, to better observe the fluid agitation, the acceleration-time and spectrum graphs in the North-South direction, which caused the maximum displacement (approximately 0.23 m), are shown in Figure 4 and 5 [20].

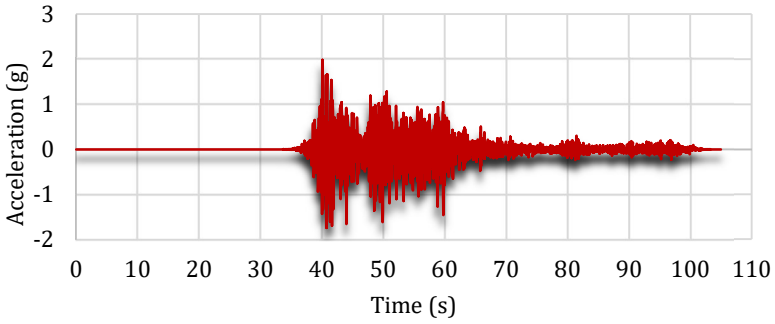


Figure 4. Acceleration-time graph (N-S, Pazarcık 2023).

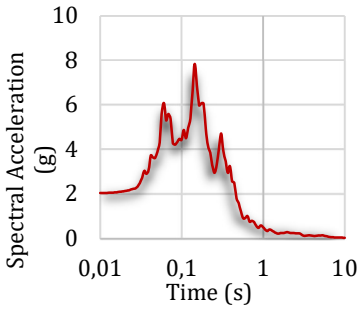


Figure 5.. Spectral acceleration-period graph (N-S, Pazarcık 2023).

IV. Results

The analysis results are systematically categorized into three principal sections to facilitate comprehensive understanding. The first section encompasses a detailed depiction of the water surface configurations at distinct temporal intervals, offering insight into the dynamic agitation induced by seismic forces. Subsequently, the second segment delineates the temporal evolution of displacement at the crest point of the barrier, alongside graphical representations elucidating the most pronounced displacement contours along the barrier's structure. Finally, the third section presents a rigorous examination of the main channel's most heavily stressed regions, identified through meticulous point selection, manifesting through temporal profiles of maximum principal tensile and compressive stresses.

A. Surface Sloshing of Open Channel

The surface profiles resulting from sloshing are magnified by a factor of 5 in the y-y direction for different time intervals, as depicted in Figure 6. Following the examination of the model, it is evident that the mass of water within the main channel (highlighted in blue) has been set in motion and agitated under the influence of the earthquake. The distance between the wave crest and trough measures approximately 0.5 meters. The wave height corresponds to approximately 11% of the water depth (h=4.5m).

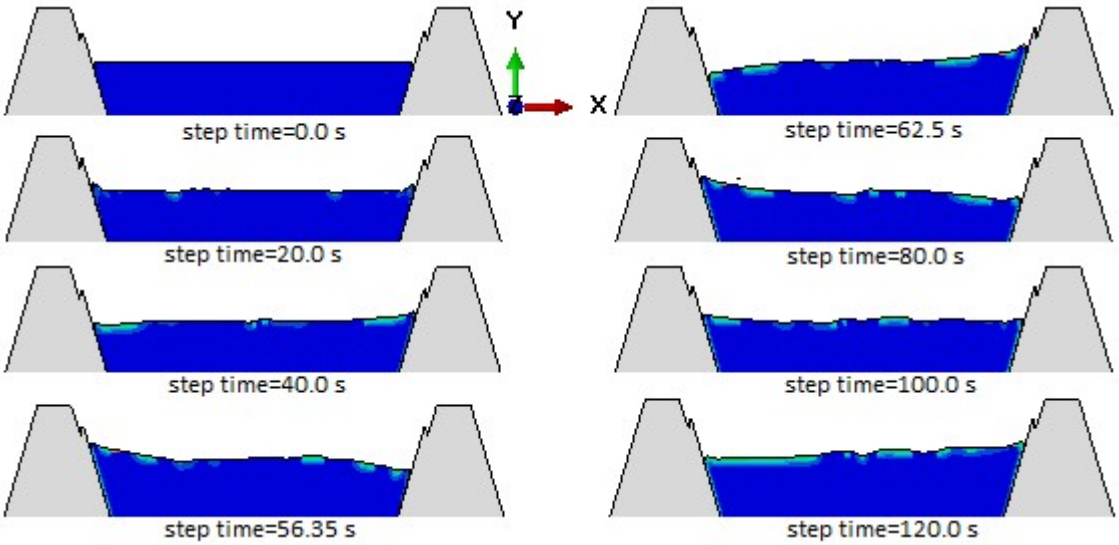


Figure 6. Fluid sloshing surface shapes.

In the model, since there is no partition wall or porous diaphragm limiting the transition between the fluid and the channel walls, it moves. Under the seismic effect, the fluid collides with the channel walls and returns, potentially leading to an increase in sloshing height and overflow from the channel. These findings are consistent with the results obtained in the literature cited [21]-[23].

B. Displacements

The relative displacement between the crest and the base of the wall is depicted in displacement-time graphs in Figures 7. When examining Figure 7, for the left embankment in the empty main channel model, the maximum relative displacement value at the crest is measured as 0.0127 m, whereas in the water-filled model, it is measured as 0.0202 m. For the right embankment, in the empty main channel model, the maximum relative displacement value at the crest is -0.0434 m, while in the water-filled model, it is -0.0509 m.

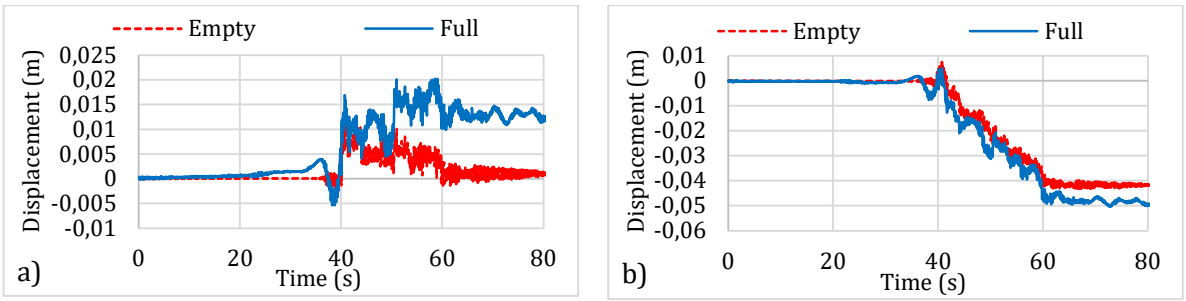


Figure 7. Relative displacement-time graphs of the crest of the embankment, a) left embankment, b) right embankment.

The contour diagrams of the maximum relative displacement for both models are provided in Figure 8. It can be observed that the relative displacement in the filled model has increased by 59% for the left embankment and 17% for the right embankment compared to the empty model.

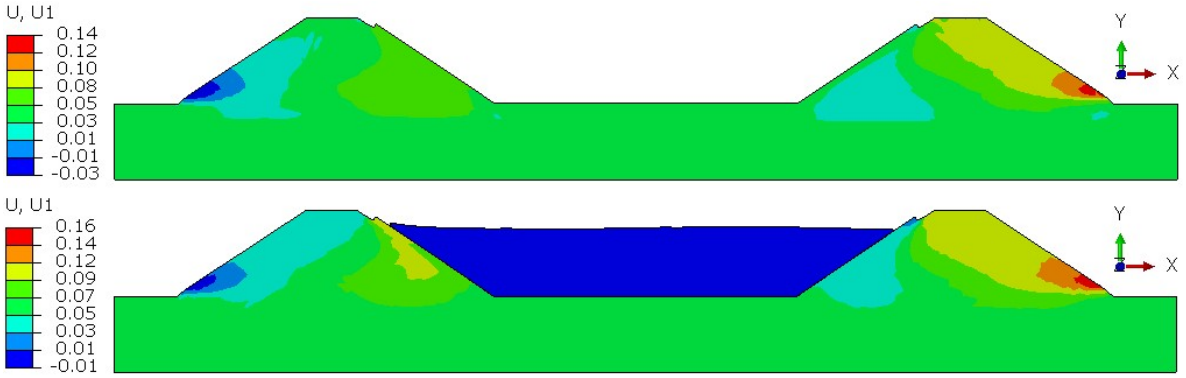


Figure 8. Contour diagrams of maximum relative displacement (m) a) when the main channel is empty, b) when the main channel is filled on the left side.

C. Stresses

It was hypothesized that the introduction of fluid would provoke an escalation in both the maximum principal tensile stresses (S_{max}) and the maximum principal compressive stresses within the water-filled model. Graphs illustrating the time-dependent variations of the maximum principal tensile stresses (S_{max}) are delineated in Figure 9. A discernible augmentation of 26 percent in the maximum principal tensile stresses was noted upon comparing the water-filled model with the void one, as evidenced by Figures 9.

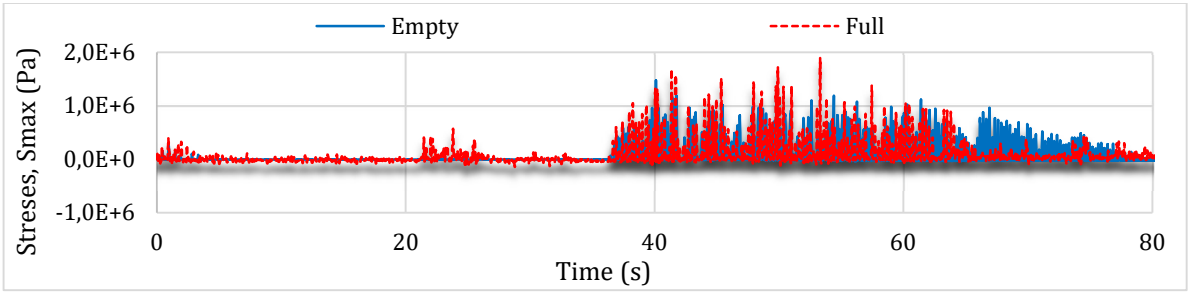


Figure 9 Time-dependent graphs of maximum principal tensile stresses (Smax). a) when the main channel is empty, b) when the main channel is filled.

Figure 10 presents the time history plots of maximum principal pressure stresses (S_{min}). A comparison between the empty and water-filled models reveals a 7.4% increase in the maximum principal pressure

stresses in the latter. It is noteworthy that the absence of additional fluid weight in the empty model led to the least maximum principal pressure stresses.

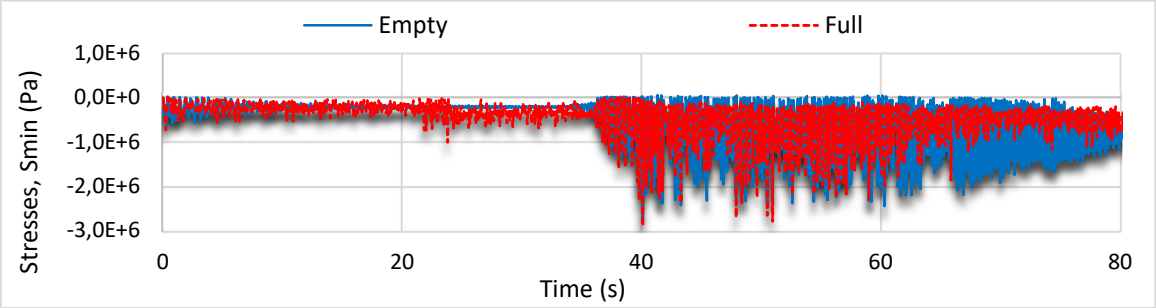


Figure 10 Time history plots of maximum principal pressure stresses (Smin). a) When the main channel is empty, b) When the main channel is filled with water.

V. Conclusion

This study conducted a dynamic analysis to examine the seismic responses of a primary irrigation channel under both empty and filled conditions. The seismic data of the 06/02/2023 Pazarcık/Kahramanmaraş earthquake, with an estimated peak ground acceleration (PGA) of 2.0g, served as the basis to discern destructive earthquake effects. Water was employed as the fluid medium in the main irrigation channel, with material properties and dimensions drawn from relevant literature sources. The analysis yielded the following outcomes:

- The adoption of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach unveiled the perceptible manifestation of water agitation in response to seismic forces. The analytical scrutiny facilitated the discernment of agitation dynamics and potential water overflow occurrences during seismic events.
- During instances of destructive earthquakes, the amplitude of water agitation within the main channel reached an approximate magnitude of 11% concerning the water level.
- Considering the dynamic fluid-structure interaction, relative displacements within the filled model exhibited a noticeable escalation, ranging between 17% and 59% compared to the empty counterpart.
- The agitation-induced effects, coupled with the liquid mass, engendered an incremental surge of 26% and 7.4% in the maximum principal tensile stresses (S_{max}) and maximum principal pressure stresses (S_{min}), respectively.

Across all models, the spatial distribution of maximum principal pressure stresses and maximum principal tensile stresses predominantly converged in regions proximal to the channel base, historically susceptible to structural compromise during seismic occurrences.

VI. Suggestions

Investigations into various research avenues in this domain are outlined below:

- Optimization of Seismic Performance: The dimensions of main channels are unique to each structure. Therefore, research efforts can focus on determining the optimal water depth and air clearance to enhance seismic performance.
- Fluid-Structure Interaction Analyses for Earthquakes with Different PGA Values: Seismic analyses considering fluid-structure interaction can be conducted for earthquakes with different Peak Ground Acceleration (PGA) values, and the results can be compared.

VII. Inference

The analyses have demonstrated how the seismic performance of main channels varies between empty and filled states. Therefore, it is recommended that static and hydraulic calculations of main channels include dynamic analyses and agitation studies, considering fluid-structure interaction effects. This approach can help mitigate the risk of flooding during potential earthquakes.

REREFENCES

[1] URL-1: News: https://www.emlaktasondakika.com/genel/dsiden-dunyanin-cevresini-3-kez-turlayacak-uzunluga-sahip-su-kanali-45546.html (Erişim Tarihi: 06.01.2024).

[2] URL-2: News https://www.emlaktasondakika.com/genel/dsiden-dunyanin-cevresini-3-kez-turlayacak-uzunluga-sahip-su-kanali-45546.html (Erişim Tarihi: 06.01.2024).

[3] URL-3: News: http://www.yapi.com.tr/haberler/aksarayda-sulama-kanali-patladi_179819.html (Erişim Tarihi: 06.01.2024).

[4] URL-4: News: https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/adiyamanda-betonarme-sulama-kanali-depremde-yaklasik-2-metre-kaydi/2877200 (Erişim Tarihi: 12.01.2024).

[5] Ramamurthy, A. S., Han, S. S., & Biron, P. M. (2013). Three-dimensional simulation parameters for 90 open channel bend flows. Journal of Computing in Civil Engineering, 27(3), 282-291.

[6] Johnson, E. D., & Cowen, E. A. (2020). Remote estimation of turbulence intensity variation in open channels. Journal of Hydraulic Engineering, 146(9), 04020062.

[7] Ferraro, D., Coscarella, F., & Gaudio, R. (2022, May). Reliability of ADV measurements for the analysis of the universal laws of turbulence. In 2022 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEn) (pp. 209-214). IEEE.

[8] Guerin Gray, W., & Timothy Miller, C. (2023). On the equations of open channel flow. Journal of Hydraulic Research, 61(1), 1-17.

[9] Huang, L., Li, H., Lupunga, M. A., Xu, J., & Zhang, C. (2023). Seismic response analysis of double-trough aqueduct considering fluid-structure interaction effect. Plos one, 18(8), e0289600.

[10] Skrzat, A., (2012). Application Of Coupled Eulerian-Lagrangian Approach in Metal Forming Simulations. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 284, Mechanika z. 84 (4/12).

[11] Benson D.J., Okazawa S., 2004, Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, Computer Methods Appl. Mech. Engng., 193 (2004), 4277-4298.

[12] Benson D.J., 1997, A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations, Computer Methods Appl. Mech. Engng., 140 (1997), 59-86.

[13] Belytschko T., Liu K.W., Moran B., 2014, Non-linear Finite Element Analysis for continua and structures, 2nd Edition, ISBN: 978-1-118-63270-3 January 2014 832 pages New York.

[14] Al-Athel K.S., Gadala M.S., 2011, Eulerian volume of solid (VOS) approach in solid mechanics and metal forming, Computer Methods Appl. Mech. Engng., 200 (2011), 2145-2159.

[15] URL-5 https://www.milliyet.com.tr/ekonomi/yukari-harran-ovasi-sulamasi-ana-kanali-hizmete-acildi-1178875 (Erişim Tarihi: 13.01.2024).

[16] Wu, Y. F., & Jiang, C. (2013). Quantification of bond-slip relationship for externally bonded FRP-to-concrete joints. Journal of Composites for Construction, 17(5), 673-686.

[17] Sulama Şebekesi İnşaati Genel Teknik Şartnamesi, 2006, https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/740/1088/DosyaGaleri/sulama-tesislerinde-sanat-yap%C4%B1lar%C4%B1-in%C5%9Faat%C4%B1-teknik-%C5%9Fartnamesi_r00_20061110.pdf

[18] Yiğit, M.E., Dalga Sediment ve Sıvılaşan Zemin İtkilerine Maruz Rıhtım Kazıklarının Dinamik Analizi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 189s, Manisa.

[19] ABAQUS, 2010, Version 6.10. ABAQUS user's manual, Dassault Systèmes, SIMULIA.

[20] AFAD, 2023, İçişleri Bakanlığı "Afet ve Acil Durum Daire Başkanlığı". https://deprem.afad.gov.tr/content/131 (Erişim Tarihi: 01.11.2023)

[21] Kahramanmaraş Depremleri Ve Artçılarını, Saha Gözlemlerini, Yapısal Hasarları ve İleriye Yönelik Önerilerini İçeren Değerlendirme Raporu,2023. https://www.subu.edu.tr/sites/subu.edu.tr/files/2023-04/Kahramanmaras%CC%A7%20Deprem%20Raporu_12.04.2023.pdf

[22] Mogilevich, L., I., Popov, V., S., Popova, A., A., Khristoforova, A.V., (2022). Mathematical Simulation of Nonlinear Vibrations of a Channel Wall Interacting with a Vibrating die Via Viscous Liquid Layer. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 26-41. doi: 10.18698/0236-3933-2022-2-26-41

[23] Yanke, S.., Lin, X.., Rongbin, H.., Dekang, Z., Duoxin, Z. (2022). Seismic Response and Damage Analysis of Large Inverted Siphon Structure. Shock and Vibration, 2022:1-13. doi: 10.1155/2022/5404908

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yüksek Basınçlı Alüminyum Dökümde Magmasoft Yazılımıyla Sıkıştırma Pimlerinin Alüminyum Parça Üzerindeki Etkisi

Deniz Güler [a], Barış Çavunt [b]*

[a]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
[b]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
*Sorumlu Yazar: deniz.guler@doktas.com

ÖZET

Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm (YBAD) ergimiş alüminyumu basınç altında kalıp boşluğuna doldurma prosesidir. Değişken parça yapısına bağlı olarak türbülans, gaz boşluğu ve et kalınlığına bağlı olarak parça üzerinde hatalara sebep olabilir. Bu hataları önlemek için kullanılan yöntemlerden biri, kalıp içerisine yerleştirilen hareketli pimlerin, dolum tamamlandıktan sonra katılaşma sırasında YBAD tezgahı yardımıyla hareket ettirilerek ergiyik alüminyumun parça içine sıkıştırılmasıdır. Bu sayede oluşabilecek porozite hatalarının önüne geçilmektedir. Bu araştırma, MagmaSoft yazılımının kullanılarak sıkıştırma pimlerinin konumunu, sıkıştırma parametrelerinin alüminyum parça üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Simülasyonlar, malzeme akışı, katılaşma süreci ve parça kalitesi gibi sonuçları gerçekçi şekilde elde etmektedir. Yapılan bu çalışmalar, parçanın uygun bölgelerine konumlandırılmış ve uygun parametreler seçilmiş sıkıştırma pimlerinin poroziteye olan etkisini açığa çıkartmaktadır. Sıkıştırma uygulaması yapılmış ve yapılmamış iki parçanın karşılaştırılması hem bilgisayar destekli ortamında hem de deneysel koşullarda test edilmiştir. X-Ray ve MagmaSoft sonuçları incelenerek elde edilmiştir. Bu incelemeler sonucunda sıkıştırma uygulanan parçanın porozite miktarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Porozite, *Sıkıştırma Parametreleri*, Sıkıştırma Pimi, *Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm.*

The Effect of Squeeze Pins on the Aluminum Part in High Pressure Die Casting with Magmasoft Software

ABSTRACT

High-Pressure Die Casting (HPDC) is the process of filling molten aluminum into the cavity under pressure. The variable constructures may cause defects on the part due to turbulence, gases, and wall thickness. This method used to prevent these errors is to compress the molten aluminum into the part by moving the squeeze pins placed in the mold with the help of the HPDC machine during solidification after the filling is completed. In this way, porosity defects that may occur are prevented. This research analyzes in detail the position of squeeze pins and the effects of squeeze parameters on the aluminum part using MagmaSoft software. Simulations realistically achieve results such as flow, solidification process, and part quality. These studies reveal the effect of squeeze pins positioned in appropriate areas of the part and appropriate parameters selected on porosity. A comparison of two parts with and without squeeze applications was tested both in the computer-aided program and experimental conditions. This study aims to evaluate the effect of squeeze application in HPDC on part quality and production efficiency. X-ray and MagmaSoft results were obtained by examining. In conclusion, it was observed that the porosity amount of the squeeze part was lower.

Keywords: *Aluminum, High-Pressure Die Casting, Porosity, Squeeze Parameters, Squeeze Pin.*

I. GİRİŞ

Son yıllarda alüminyum alaşımları yüksek mekanik özelliklere, düşük özkütleye sahip olmalarına ve yüksek korozyon dayanımına sahip olduklarından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılan bir malzemedir [1-2]. Alüminyum alaşımlarının üretim metotlarından bir tanesi ise yüksek basınçlı alüminyum dökümdür(YBAD). YBAD, özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve savunma gibi sektörlerde kullanılan hafif ve dayanıklı parçaların üretiminde ideal bir çözüm sunmaktadır YBAD, 1000 bar basınca kadar ulaşan ergimiş alüminyumun kalıp boşluğa doldurma yöntemidir. Yüksek basınca sahip olduğu için karmaşık ve ince kesitli parça tasarımlarının üretimine olanak vermektedir [3]. Ancak, bu döküm yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kalıp tasarımı ve işlem kontrolü parça kalitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır [4]. Döküm işlemi sırasında ortaya çıkan kalite sorunları, parça performansını ve üretim verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, döküm prosesindeki çeşitli parametrelerin optimize edilmesi ve kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

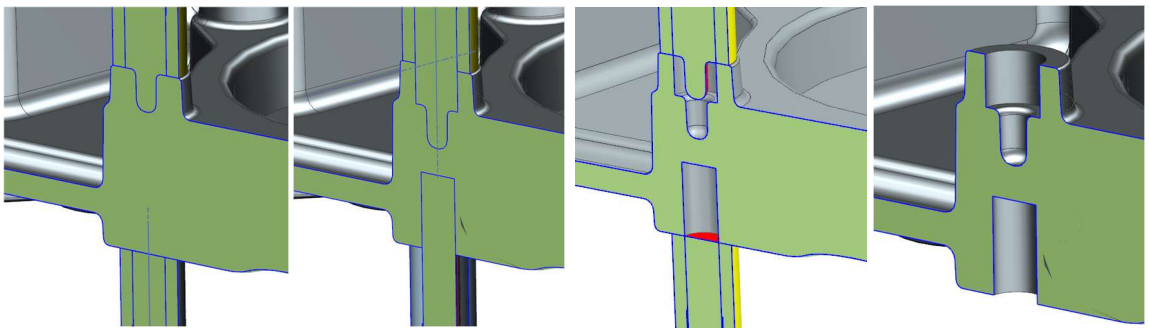
Bu bağlamda, son yıllarda simülasyon teknolojilerindeki ilerlemeler, döküm prosesinin daha iyi anlaşılmasını ve iyileştirilmesini sağlamıştır. Magmasoft gibi benzeri simülasyon yazılımları, döküm prosesini daha iyi anlamak ve optimize etmek için önemli bir araç haline gelmiştir [5]. Magmasoft yazılımı, döküm prosesindeki karmaşıklığı analiz etmek, potansiyel sorunları önceden belirlemek ve döküm kalitesini artırmak için kapsamlı bir simülasyon ortamı sunmaktadır. Bu yazılımın kullanımı, döküm işlemine ilişkin maliyetleri azaltabilir, üretim süresini kısaltabilir ve son ürün kalitesini artırabilir.

Kalın kesitli bölgelerde soğuma ve katılaşma fazlarının parça içerisindeki farklılıklarından dolayı döküm boşluğu meydana gelmektedir [6]. Bu şekilde oluşan döküm boşluğuna çekinti porozitesi denmektedir. Çekinti porozitesini engellemek için kullanılan yöntemlerden bazıları; kalıpta bölgesel soğutma kullanımı, yüksek kalıp içi basınç ve sıkıştırma prosesidir [7]. Bu yöntemleri kullanılması ile çekinti porosite hatası minimize edilebilir veya tamamen giderilebilir.

Bu çalışmanın sonuçları, yüksek basınçlı alüminyum döküm endüstrisinde döküm kalitesini artırmak ve üretim verimliliğini optimize etmek için değerli bir katkı sağlayabilir. Sıkıştırma pimlerinin uygun tasarımı ve konumlandırılması, döküm prosesinde parça kalitesini iyileştirebilir, çekinti porozitesi gibi kalite sorunlarını azaltabilir. Bu çalışma, Magmasoft yazılımının döküm endüstrisindeki önemli rolünü vurgulayarak, döküm prosesindeki süreç iyileştirmelerine yönelik yeni fırsatlar sunabilmektedir.

II. MATERYAL METOT

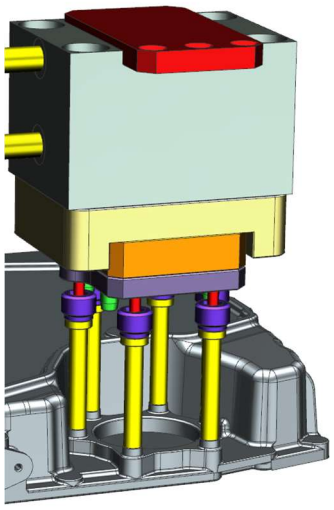
Bu çalışma yüksek basınçlı alüminyum döküm metodu ile üretilen parçanın kalın kesitli veya porozite olma riski yüksek olan bölgelerde sıkıştırma pimlerinin kullanılması üzerine yoğunlaşılmıştır. Sıkıştırma pimlerin çalışma prensibi ergimiş alüminyumun kalıp boşluğuna dolumundan sonra katılaşma fazında bölgesel olarak pimlerin parça içerisine sıkıştırmasıdır. Bu sayede sıkıştırma bölgelerindeki basınç artışı ile döküm boşlukları minimize edilerek parça kalitesi arttırılabilmektedir [8]. Bu çalışmanın hedefi ise sıkıştırma pimlerinin kullanılmasıyla kalın kesitli bölgelerde oluşabilecek çekinti porozitesini azaltmak, sıkıştırma pimlerinin başlangıç süresini iyileştirmek ve sıkıştırma süresinin iyileştirilmesidir. Şekil 1'de sıkıştırma piminin prosesi gösterilmiştir. Şekil 1a'da sıkıştırma piminin parça üzerindeki uygulamasına başlamadan önceki pozisyonudur. Şekil 1b'da ise sıkıştırma piminin parça üzerinde uygulandığı halidir. Şekil 1c'de sıkışırma piminin uygulama sonrası geri çekildiği pozisyonudur. Şekil 1d ise sıkıştırma prosesinin uygulanmasından sonra parça geometrisi gösterilmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 1. Sıkıştırma piminin proses adımları

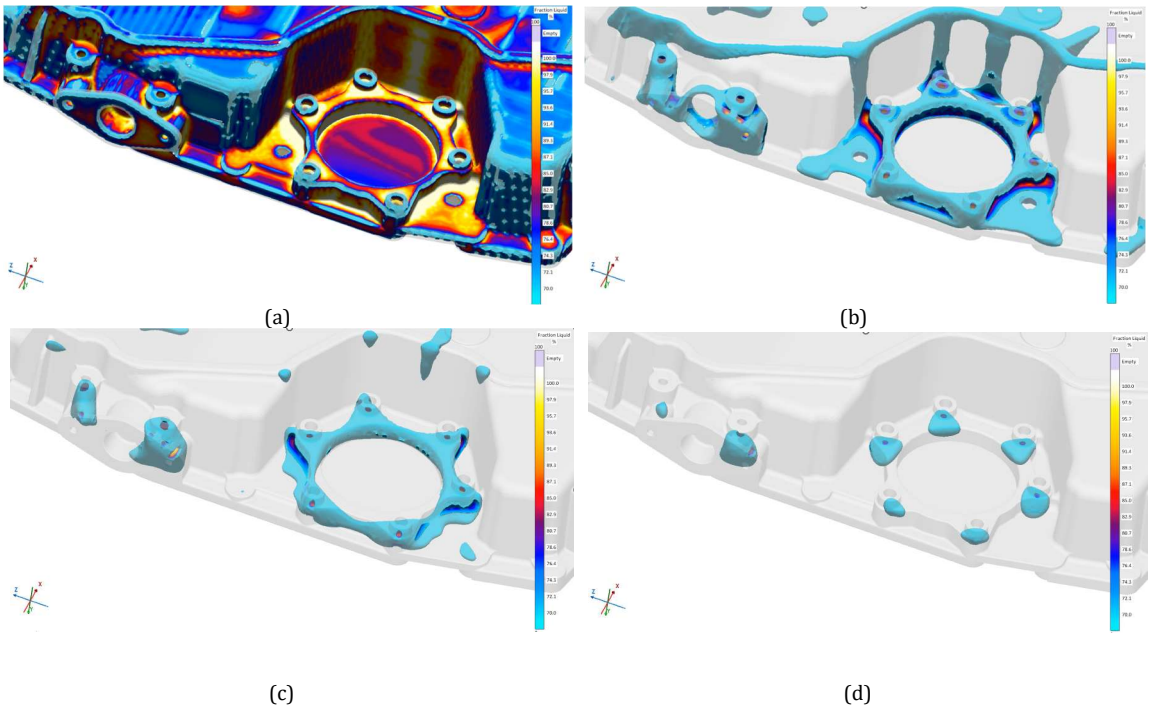
Sıkıştırma pimlerinin avantajlarının karşın bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlarından bazıları ise; kalıp ve bakım maliyetlerinin fazla olması, kalıp tasarımındaki zorluklar ve üretim sürekliliğinin stabil şekilde devam etmesidir. Şekil 2'de görüldüğü gibi sıkıştırma piminin kullanımı için kalıpta birçok yardımcı parça kullanılmaktadır. Bu sebeple parça üzerinde gerçekten ihtiyaç olan bölgelerde kullanılması uygundur. Aksi taktirde kalıp, bakım ve üretim maliyeti ciddi miktarda artacaktır.



Şekil 2. Sıkıştırma pimleri ve yardımcı parçaların tasarımı

A. Sıkıştırma Pimlerinin Kullanılacak Bölgelerinin Belirlenmesi

Sıkıştırma pimlerinin kullanılacak bölgelerinin belirlenmesi için genellikle dolum veya tasarım yazılımlarıyla bu bölgeler tespit edilebilir. Bölgelerin tespit edilebilmesi için kalınlık analizi, katılaşma analizi, Hot Spot FSTime ve porozite analizleri gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada ise MagmaSoft yazılımı kullanılarak katılaşma analizi ve Hot Spot FSTime sonuçlarına bakılarak sıkıştırma pimlerinin bölgeleri bulunmuştur. Şekil 3'de sırasıyla 9., 12., 15. ve 21. saniyesindeki katılaşma sonuçları gösterilmiştir. Bu sayede en son katılaşan bölgelerde oluşabilecek çekinti porozite riskleri tespit edilmiştir.

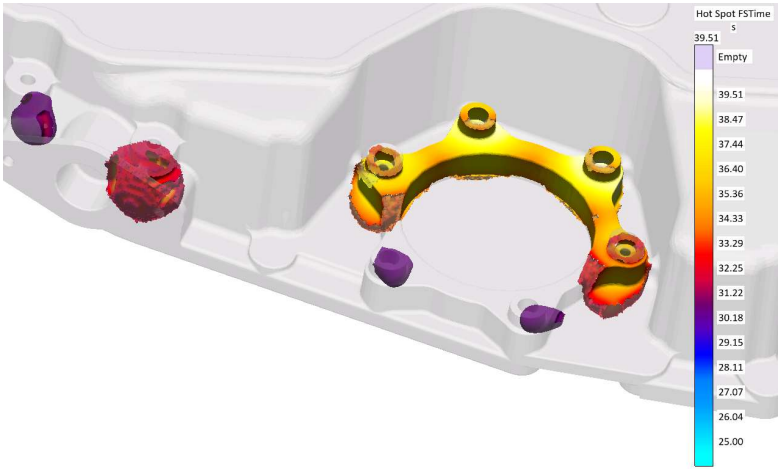


(a) (b)

(c) (d)

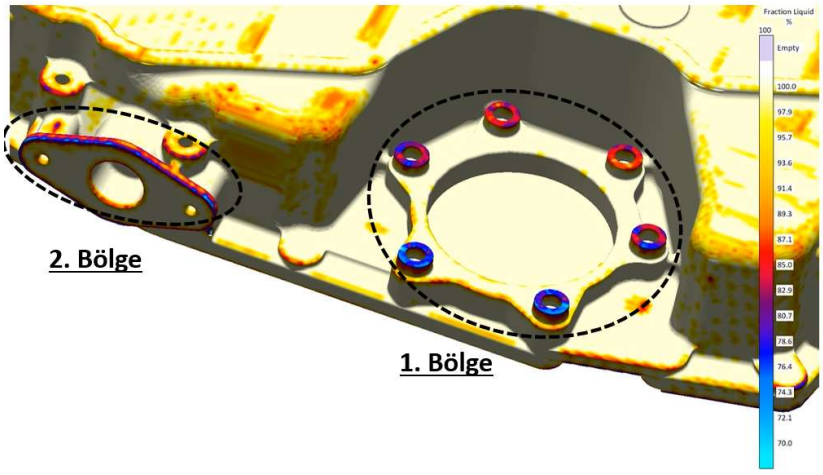
Şekil 3. Parçada 9., 12., 15. ve 21. saniyesindeki katılaşma sonuçları

Sıkıştırma pimlerinin kullanılacak bölgelerinin katılaşma sonucu ile bulmasına rağmen Hot Spot FSTime sonucu ile karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Hot spot FSTime parçanın en son katılaşan ve en sıcak bölgelerini gösteren sonuçtur [9]. Ergimiş metalin Hot Spot bölgelerine ulaşamaması ve besleyememesinden dolayı porozite hatası oluşabilmektedir. Şekil 4'de Hot Spot FSTime sonucu gösterilmektedir.



Şekil 4. Hot Spor FSTime Sonucu

MagmaSoft yazılımı üzerinden hem katılaşma sonucu hem de Hot Spot FSTime sonuçları incelenerek sıkıştırma bölgelerine karar verilmiştir. Her iki sonuçta da aynı bölgelerde risk olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında sıkıştırma pimleri bu parçada 2 farklı bölgede uygulanmıştır. Analiz sonuçları ile bulunan 2 bölge Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu bölgelerin sıkıştırma parametreleri farklı farklı uygulanabilirken kendi içlerinde aynı sıkıştırma parametreleri uygulanabilmektedir.



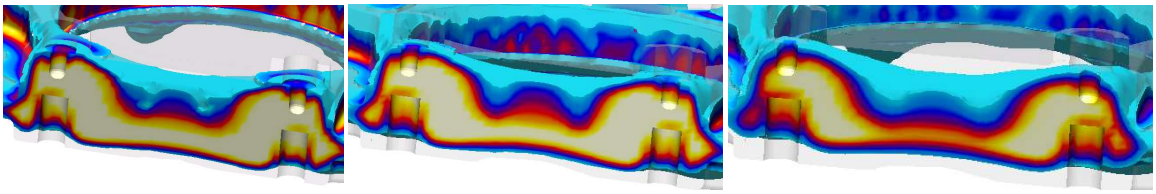
Şekil 5. Sıkıştırma uygulanan bölgeler

B. Sıkıştırma Pimlerinin Uygulandığı 1. Bölge

Belirlenen sıkıştırma pimlerinin 1. bölgesinde toplam 6 tane sıkıştırma pimi mevcuttur. Bu 6 adet sıkıştırma piminin tasarımsal olarak birbirinin benzeri olduğu için sıkıştırma parametrelerin aynı olması yeterli görülmüştür. Bu sebeple bu sıkıştırma pimleri için tek bir hidrolik sistem kullanılmaktadır. Sıkıştırma pimlerinin sadece uygulaması yeterli değildir. Sıkıştırma başlangıcı süresi, sıkıştırmanın uygulama süresi ve sıkıştırma basıncı gibi parametreler uygulanacak bölgeye göre değişiklik gösterebilir.

Bu çalışmada sıkıştırma parametreleri MagmaSoft yazılımında katılaşma analizi ile belirlenmiştir. Şekil 6'da dolum tamamlandıktan sonra 2,5s, 3,5s ve 4,5 saniyelerinde katılaşma miktarları sırası ile a, b ve c'de gösterilmiştir. Bu saniyelerin belirlenmesi sıkıştırma uygulanacağı anda sıkıştırma bölgesinin tamamen sıvı veya tamamen katı olmaması gerekmektedir. Bunun sebebi ise tamamen sıvı halde uygulandığında o bölgede yine kalın bölgedeki soğuma farklılığı olacağından dolayı çekinti porozite riski bulunmaktadır. Katı halde iken ise sıkıştırma pimlerinin kırılma riski ve ömrünün azalması gibi sonuçlara sebep olabilir.

Bu nedenlerden dolayı katılaşma dış çevrelerden başladığında farklı başlangıç süreleri ile sıkıştırma uygulaması yapılmalıdır. Bunun yanı sıra tüm deney setlerinde 25 saniye sıkıştırma süresi ve 1000 bar basınç ile sıkıştırma uygulanmaktadır. Sıkıştırma süresi uygulanan bölgedeki katılaşmanın tamamlandıktan sonra sıkıştırma pimleri geri çekilir. Ayrıca sıkıştırma basıncı ise kalıp içi basınçtan yüksek olmalıdır.



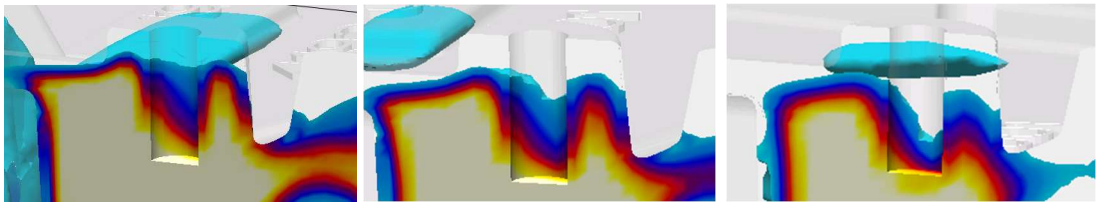
(a) (b) (c)

Şekil 6. 1. bölgenin 2,5s, 3,5s ve 4,5 saniyelerdeki katılaşma sonucu

C. Sıkıştırma Pimlerinin Uygulandığı 2. Bölge

Belirlenen sıkıştırma pimlerinin 2. bölgesinde toplam 2 tane sıkıştırma pimi mevcuttur. Bu 2 adet sıkıştırma piminin tasarımsal olarak birbirinin benzeri olduğu için sıkıştırma parametrelerin aynı olması yeterli görülmüştür. 1. Bölgeye göre farklı hidrolik sistem kullanıldığı için ayrı zamanlarda çalıştırılabilmektedir.

Şekil 7'da dolum tamamlandıktan sonra 3s, 4s ve 5. saniyelerinde katılaşma miktarları sırası ile a, b'de gösterilmiştir. Bunun yanı sıra tüm deney setlerinde 1. bölge gibi 25 saniye sıkıştırma süresi ve 1000 bar basınç ile sıkıştırma uygulanmaktadır.



(a) (b) (c)

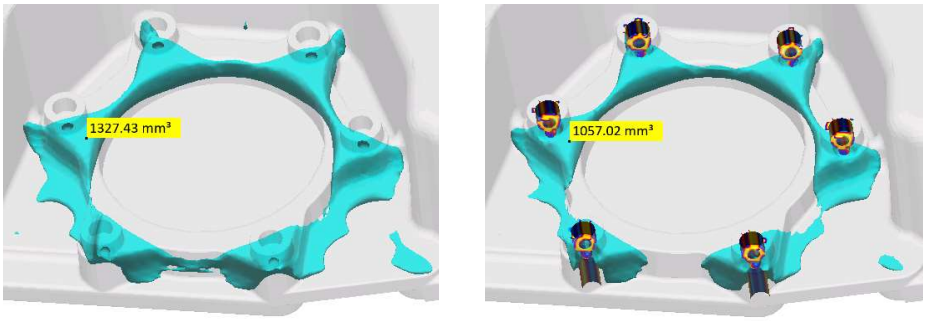
Şekil 7. 2. bölgenin 3s,4s ve 5. saniyelerdeki katılaşma sonucu

III. SONUÇLAR

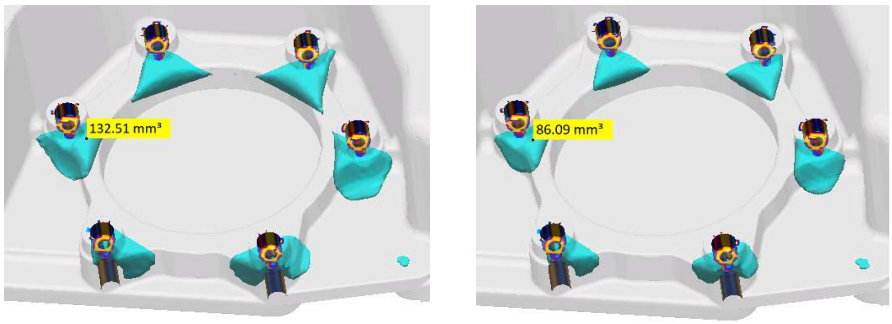
Katılaşma sonucundan oluşturulan sıkıştırma çalışmaları MagmaSoft yazılımı üzerinden porozite sonuçları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca yapılan analiz programındaki parametreler deneysel olarak yapılmış ve doğrulanmıştır.

A. 1. Sıkıştırma Bölgesinin Porozite ve X-Ray Sonuçları

Sıkıştırma uygulanan 1. bölgenin analiz programı üzerinden porozite sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. 3 farklı sıkıştırma süresi ve sıkıştırma uygulamasının olmadığı versiyonu eklenmiştir. Sırası ile sıkıştırmasız, 2,5s, 3,5s ve 4,5 saniyedeki sıkıştırma süreleri a, b, c ve d şekillerinde görülmektedir. Yaklaşık olarak 1327 mm³'lük porozite hacim riski doğru sıkıştırma parametreleri ile 86 mm³'lük riske düşürülmüştür.



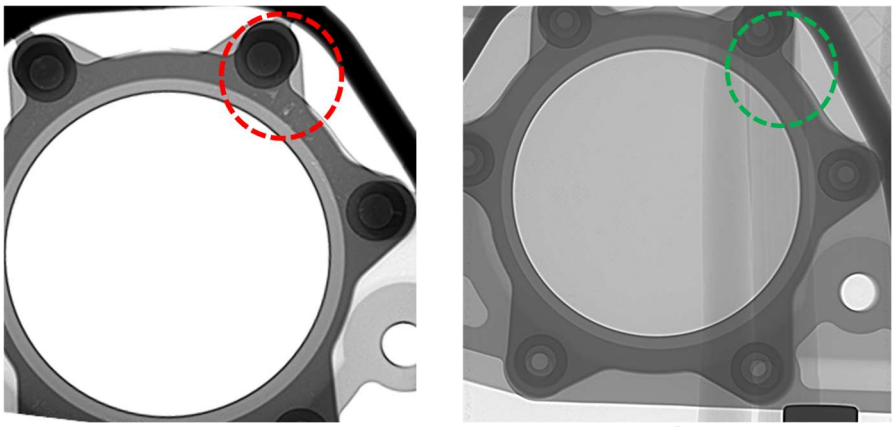
(a) (b)



(c) (d)

Şekil 8. 1. bölgenin 2,5s, 3,5s ve 4,5 saniyelerdeki MagmaSoft Yazılımı üzerinden porozite sonucu

Bilgisayar destekli yazılım ile alınan analiz sonuçlarının ardından döküm denemeleri ile karşılaştırılmıştır. MU 2000 cihazı kullanılarak X-Ray görselleri alınmış, TS EN ISO 5579 standardına göre kontrol edilmiştir. İstenen porozite seviyeleri ASTM E505 referansına göre incelenmiştir. Sıkıştırma pimlerinin uygulanmamasının veya yanlış uygulanmasının sonucu Şekil 9a'da X-Ray sonucu ile gösterilmiştir. Kırmızı daire ile alınan bölgede görüldüğü üzere poroziteler mevcuttur. Etkin sıkıştırma uygulamasının X-Ray görüntüsü ise Şekil 9b'de gösterilmiştir. Karşılaştırılan bölgelerde porozite seviyeleri ciddi miktarda azaltılmıştır.



(a) (b)

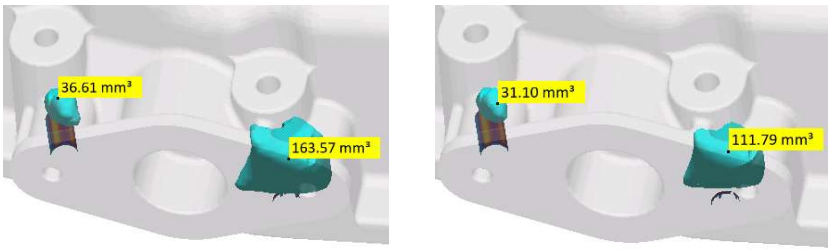
Şekil 9. 1. bölgenin etkin olmayan sıkıştırma uygulaması ve etkin sıkıştırma uygulamasının X-Ray görüntüsü

B. 2. Sıkıştırma Bölgesinin Porozite ve X-Ray Sonuçları

Sıkıştırma uygulanan 2. bölgenin analiz programı üzerinden porozite sonuçları Şekil 10'de gösterilmiştir. 3 farklı sıkıştırma süresi ve sıkıştırma uygulamasının olmadığı versiyonu eklenmiştir. Sırası ile sıkıştırmasız, 3s, 4s ve 5. saniyedeki sıkıştırma süreleri a, b, c ve d şekillerinde görülmektedir. Yaklaşık olarak sol ve sağ bölgelerde 69 ve 334 mm³'lük porozite hacim riski doğru sıkıştırma parametreleri ile sırasıyla 31 ve 112 mm³'lük riske düşürülmüştür.



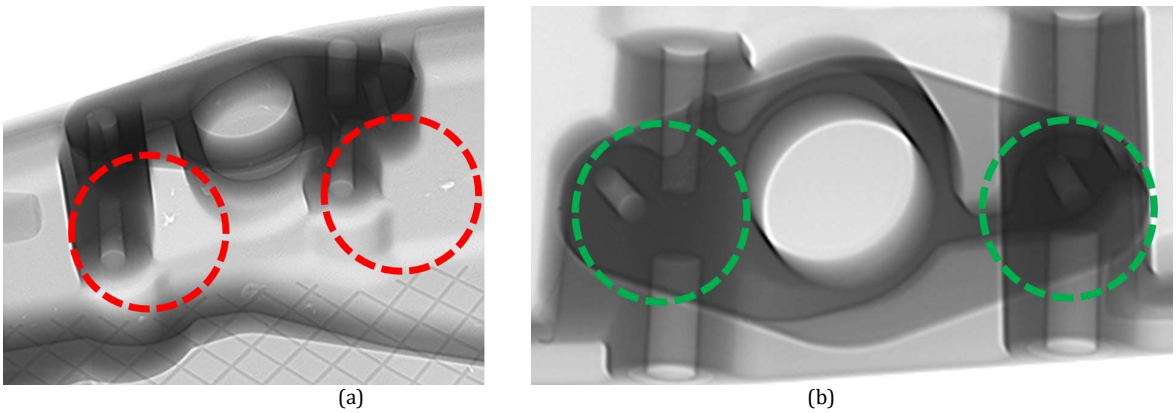
(a) (b)



(c) (d)

Şekil 10. 2. bölgenin 3s, 4s ve 5. saniyedeki MagmaSoft Yazılımı üzerinden porozite sonucu

Bilgisayar destekli yazılım ile alınan analiz sonuçlarının ardından döküm denemeleri ile 2. Bölge için de karşılaştırılmıştır. Sıkıştırma pimlerinin uygulanmamasının veya yanlış uygulanmasının sonucu Şekil 11a'da X-Ray sonucu ile gösterilmiştir. Kırmızı daire ile alınan bölgede görüldüğü üzere poroziteler mevcuttur. Etkin sıkıştırma uygulamasının X-Ray görüntüsü ise Şekil 11b'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 11. 2. bölgenin etkin olmayan sıkıştırma uygulaması ve etkin sıkıştırma uygulamasının X-Ray görüntüsü

Her iki bölgede de doğru parametreler ile uygulanan sıkıştırma pimleri, porozite miktarını ciddi miktarda düşürdüğü gözlemlenmiştir. Hem MagmaSoft yazılının hem de döküm denemelerinin X-Ray sonuçlarında düşürülen porozite sonuçları birbiri ile eşleşmektedir. Katılaşma sonucuna göre belirlenen sıkıştırma süreleri ile istenilen kalite standartlarında parça üretimi yapılabilmektedir.

IV. TARTIŞMA

Otomotiv sektöründe kullanılan alüminyum döküm parçasının porozite seviyesi kalite standartlarına uygun şekilde dökümü gerçekleştirilmiştir. Kalın kesitli parça tasarımına sahip olan YBAD parçalarının dökümünü sıkıştırma pimlerinin uygulanması sayesinde düşük porozite seviyesinde üretilmiştir. Her ne kadar sıkıştırma pimlerinin uygulanması için kalıp ve bakım maliyetlerini arttırmasına rağmen ciddi miktarda bölgesel olarak iyileşme sağlamaktadır. Fakat sıkıştırma uygulamasının gerekli bölgelere ve uygun parametrelerde verilmesi ile iyileşme sağlanabildiği bu çalışmada gösterilmiştir. Katılaşma analizinde yapılan farklı sürelerdeki deneme sonuçlarının değerlendirmesi ile uygun parametrelerin tespit edilmiştir. Bu sayede porozite sonuçlarında ciddi iyileşmeler sağlanmıştır.

V. ÇIKARIM

Çalışmada öncelikle çekinti porozite oluşumunun gözlendiği bölgeler bulunmuştur. Bu bölgelerin sıkıştırma piminin uygulanmasının belirlenmesi MagmaSoft yazılımı kullanılmıştır. Hem sıkıştırmasız hem de farklı sürelerde uygulanan sıkıştırma pimleri karşılaştırılarak 2 farklı bölgede uygulanmıştır. Bu bölgedeki sonuçları deneysel ortamda doğrulayabilmek için döküm denemeleri yapılmıştır. Döküm denemelerinin X-Ray görüntüleri ile porozite miktarları bulunmuştur. Bu denemeler MagmaSoft yazılımı ile karşılaştırıldığında belirlenen sıkıştırma parametresi uygulanan parçalarda daha az miktarda poroziteye sahip olduğu gözlemlenmiştir. YBAD ile üretilen parçanın sızdırmazlık gerekliliği olduğu için porozite seviyesinin yüksek olduğu bölgelerden sızdırma ihtimali çok yüksektir. Bu sebeple düşük porozite seviyesinin gerekli olduğu YBAD parçalarında eğer kalın kesitli bölgeler mevcutsa sıkıştırma uygulaması bu bölgelerde pozitif etki yaratmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu bildiriyi tamamlamamızda bize destek olan birçok kişiye teşekkür etmek isteriz. Döktaş Dökümcülük yönetimine ve çalışma arkadaşlarımıza minnettarız. Projemizin her aşamasında özveriyle çalışarak, değerli katkılarıyla bu bildirinin oluşumuna katkıda bulundular. Son olarak, bu bildiriyi okuyan ve değerli geri bildirimleriyle katkıda bulunan tüm okuyuculara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] R. Jiang, W. Zhao, L. Zhang, X. Li, and S. Guan. "Microstructure and corrosion resistance of commercial purity aluminum sheet manufactured by continuous casting direct rolling after ultrasonic melt pre-treatment," Journal of Materials Research and Technology, 22:1522-1532, 2023.

[2] M. S. Ahmed, M. S. Anwar, M. S. Islam, and M. Arifuzzaman. "Experimental study on the effects of three alloying elements on the mechanical, corrosion and microstructural properties of aluminum alloys," Results in Materials 20, 100485, 2023.

[3] C. Hu, H. Zhu, Y. Wang, C. Xia, J. Geng, D. Chen, H. Zhang, M. Wang, and H. Wang. "Microstructure features and mechanical properties of non-heat treated HPDC Al9Si0.6MneTiB2 alloys," Journal of Materials Research and Technology, 27:2117-2131, 2023.

[4] K. Dou, E. Lordan, Y. J. Zhang, A. Jacot, and Z. Y. Fan. "A complete computer aided engineering (CAE) modelling and optimization of high pressure die casting (HPDC) process" Journal of Manufacturing Processes, 60, 435-446, 2020.

[5] L. Patnaik, I. Saravanan, and S. Kumar. "Die casting parameters and simulations for crankcase of automobile using MAGMAsoft," Materials Today: Proceedings, 22(3), 563-571, 2020.

[6] Y. Zhang, E. Lardan, K. Dou, S. Wang, and Z. Fan. "Influence of porosity characteristics on the variability in mechanical properties of high pressure die casting (HPDC) AlSi7MgMn alloys," Journal of Manufacturing Processes, 56:500-509, 2020.

[7] P. Borlepwar, and S. Biradar. "Study on reduction in shrinkage defects in HPDC component by optimization of localized squeezing process," International Journal of Metalcasting, 13:915-922, 2019.

[8] S. Biradar, and P. T. Borlepwar. "Minimization of Shrinkage Porosity in HPDC Process with Local Squeeze Pin Using Flow Simulation," Manufacturing and Automation, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 435–443,2019.

[9] Magmaacademy, Newsletter, April 2019.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Elektrikli Otobüs Şarj İstasyonları için Ekonomik Enerji Yönetim Modeli: DC Şarj Üniteleri ve Yenilenebilir Enerji Sisteminin Değerlendirilmesi

Zekeriya Ege Hergüler[a,], Alper Çiçek[b]*

[a,b]Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne/Türkiye
[*]**Sorumlu Yazar:** zegeherguler@trakya.edu.tr

ÖZET

Günümüzde fosil yakıtlardan elektrik enerjisi üretimi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisine oranla daha fazladır. Fakat fosil yakıtlar çevre kirliliğine, atmosferik kirliliğe, doğadaki besin zincirinin bozulmasına ve küresel ısınma gibi birtakım sorunlara sebep olmaktadır. Bu yüzden ülkeler arasında temiz enerji üretimi için çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Fosil yakıtların yanı sıra içten yanmalı motorlara sahip araçların egzoz dumanları da çevremize ve atmosferimize ciddi zarar vermektedir. Aynı zamanda, motorlarının yüksek sesle çalışmasından dolayı bu araçlar gürültü kirliliğine de sebep olmaktadır. Bu yüzden hem gürültü kirliliğini ciddi şekilde azaltan hem de karbon salınımını sıfıra indiren elektrikli araçların üretimi ve kullanımı gittikçe yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmamızda, üzerinde barındırdığı PV paneller sayesinde üretilen elektrik enerjisiyle 60 adet elektrikli otobüsü şarj edebilen bir şarj istasyonu tasarımı yapılmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin fazlası şebekeye satılarak ek gelir elde edilebilmektedir. Edirne'ye ait gerçek güneş radyasyonu verileri kullanılarak 6 adet durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Araştırmamız, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretimini teşvik etmekle beraber fosil yakıtların tüketimini de azaltmayı hedefleyerek çevre dostu bir ulaşım sistemi sunması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: *DC Şarj ünitesi, Elektrikli otobüs, Sıfır emisyonlu araç, Şarj istasyonu, Yenilenebilir enerji.*

Economic Energy Management Model for Electric Bus Charging Stations: Evaluation of DC Charging Units and Renewable Energy System

ABSTRACT

The production of electricity from fossil fuels is higher than the production of electricity from renewable sources. However, fossil fuels cause a number of problems such as environmental pollution, atmospheric pollution, disruption of the food chain in nature and global warming. Therefore, efforts for clean energy production among countries are increasing day by day. In addition to fossil fuels, exhaust fumes from vehicles with internal combustion engines cause serious damage to our environment and atmosphere. At the same time, these vehicles also cause noise pollution due to the loud operation of their engines. Therefore, the production and use of electric vehicles, which both reduce noise pollution significantly and reduce carbon emissions to zero, have become increasingly widespread. In this study, we have designed a charging station that can charge 60 electric buses with the electrical energy generated by PV panels. The excess electricity generated can be sold to the power grid to gain additional income. Six case studies are conducted using real solar radiation data of Edirne. Our research can be considered as an important step in terms of providing an environmentally friendly transportation system by aiming to reduce the consumption of fossil fuels while encouraging the production of electrical energy with renewable energy sources.

Keywords: *Charging station, DC charging unit, Electric bus, Renewable Energy, Zero emission vehicle.*

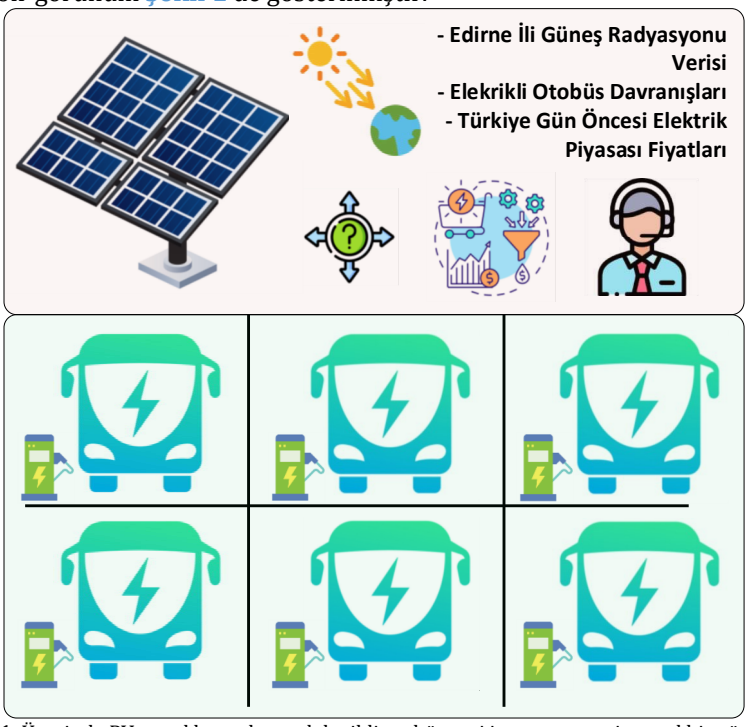
I. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde ekonomik ve siyasi anlamda meydana gelen hızlı gelişmelere bağlı olarak enerji ihtiyacı her geçen gün katlanarak artmaktadır [1]. Enerji, yenilenebilir veya yenilenemeyen kaynaklardan elde edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı tüm insanlığın geleceğini güvence altına almak için yaşamsal bir öneme sahiptir [2]. Yenilenemeyen kaynakların gelecekte tükenmesi beklenmektedir. En iyimser tahminler bile önümüzdeki 50 yıl içinde petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceğini ve ihtiyacı karşılayamayacağını göstermektedir [3]. Bu yüzden yenilenebilir kaynaklara yönelim artmaktadır. Ancak bunun yanında enerji ve enerjiye bağlı olarak ortaya çıkan çevre sorunları da gittikçe artmaktadır [4]. Çevre kirliliği karbon ve türevlerinin yanmasıyla açığa çıkan gazların atmosfere, suya, toprağa karışmasıyla gerçekleşir. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtların yanmasıyla birlikte atmosfer, su ve çevre kirliliği artış göstermektedir. Bu durum da ozon tabakasının delinmesinin hızlanmasında önemli bir rol oynayarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Sonuç olarak canlı sağlığının olumsuz şekilde etkilendiği ifade edilmelidir. Bu zararlı etkilerden dolayı devletler temiz enerji denilen yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji üretimine hızlıca geçiş yapmaya başlamaktadırlar.

Dünyadaki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu taşımacılık sektörü oluşturmaktadır [5]. Taşımacılık sektöründe kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %95'i fosil yakıtlı araçlar tarafından tüketilmektedir [6]. Bu araçların motorları verimsiz ve bakım maliyetleri de oldukça yüksektir. Fosil yakıtların çevremize verdiği olumsuz etkilerden dolayı, çevre kirliliği çok az ve aynı zamanda verimleri çok yüksek olan elektrikli araçların kullanımına geçiş yapılmaktadır. Elektrikli araçların kullandığı elektriğin de yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması çevre kirliliğini sıfıra indirmek için tavsiye edilmektedir. Elektrikli araçların sayısının artması elektrikli araç şarj istasyonlarına olan ihtiyacı da artırmaktadır. Ayrıca şehirlerde artan araç sayısı ile birlikte toplu taşıma araçlarının kullanımının arttırılması konusu da ele alınması gereken önemli başlıklardan biridir.

Bu çalışmada 2 farklı senaryo üzerinden 60 adet elektrikli otobüsün şarj olduğu ve aynı zamanda üzerinde barındırdığı PV paneller sayesinde elektrik enerjisinin temiz bir şekilde üretildiği şarj istasyonu yapısı tasarlanmıştır. Bu istasyon otobüslerin hem park edilebildiği hem de şarj edilebildiği şekilde tasarlanmıştır. Bunun sonucunda ise 6 adet durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Piyasa Takas Fiyatı (PTF) için Türkiye'ye ait gerçek piyasa değerleri ve Edirne için gerçek PV üretim değerleri esas alınmıştır. Birim elektrik ücretinin ucuz olduğu saatlerde otobüslerin şarj edilmesi, birim elektrik ücretinin pahalı olduğu saatlerde de şebekeye enerji satışı gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Böylelikle elektrikli otobüs şarj istasyonunun ekonomik yönetimi sağlanmaktadır. Elektrikli otobüsler Yutong E11 PRO, BYD-Alexander Dennis Enviro400EV, Mercedes eCitaro, Iveco Eway 18m otobüs markalarından 15'er adet olacak şekilde belirlenmiştir.

Tasarıma ait genel bir görünüm Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Üzerinde PV panel barındıran elektrikli otobüs şarj istasyonuna ait genel bir görünüm

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada üzerinde PV paneller barındıran elektrikli otobüs şarj istasyonunun içerisinde yer alan otobüslerin şarj istasyonuna geliş - ayrılış zamanları, geldiklerinde ve ayrıldıklarındaki enerji değerleri ve elektrik birim fiyatları göz önüne alınarak en optimum işletme stratejisi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yukarıda belirtilen elektrikli otobüs ve PV üretimine ait belirsizlikler için 2 farklı senaryo dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda, GAMS yazılımı kullanılarak test çalışmaları yapılmıştır.

Denklem (1) elektrikli otobüslerin istasyona ait toplam maliyet ve geliri içeren amaç fonksiyonu sunulmuştur. Amaç toplam şarj maliyetini azaltmak ve elde edilen kazancı arttırmak olarak ifade edilmelidir. Burada t, λ_t^{fiyat}, $P_t^{top-şarj}$, $P_t^{satış}$ ve ΔT sırasıyla zaman periyotları, istasyonun toplam şarj gücü, toplam satılan PV güç miktarı ve zaman çözünürlüğüdür.

$$mininim\left[\sum_t(\lambda_t^{fiyat} \cdot (P_t^{top-şarj} - P_t^{satış}) \cdot \Delta T)\right] \quad (1)$$

Denklem (2) elektrikli otobüslerin istasyona geldiği andaki enerjilerini tanımlamaktadır. $ED_{e,t}$ elektrikli otobüsünün enerji durumunu ifade etmektedir. $T^{EAvarış}$ otobüsün istasyona varış periyodudur.

$$ED_{e,t} = ED_e^{başlangıç}, \ \forall e, t = T^{EAvarış} \quad (2)$$

Denklem (3) elektrikli otobüslerin şarj durumlarını ifade etmektedir. Burada (t-1) anındaki enerji durumunun üzerine t anındaki fotovoltaik panelden elde edilen güç ya da şarj ünitesinden sağlanan güç eklenmektedir. Bataryanın tam dolması durumda ise PV panelde üretilen gücün direnç üzerinde harcandığı varsayılmıştır. $P_{e,t}^{PVotobüs}$, $P_{e,t}^{şarj}$ ve $\eta^{şarj}$ sırasıyla PV sistemden otobüse gelen şarj gücü, otobüsün şarj gücü ve şarj verimliliğidir.

$$ED_{e,t} = ED_{e,t-1} + (P_{e,t}^{PVotobüs} + P_{e,t}^{şarj}) \cdot \eta^{şarj} \cdot \Delta T, \forall e, t > 1 \quad (3)$$

Denklem (4) otobüslerin istasyondan ayrıldıklarında sahip oldukları enerjiyi göstermektedir. $T^{EAayrılış}$ otobüsün istasyondan ayrıldığı periyottur.

$$ED_{e,t} = ED_e^{son}, \ \forall e, t = T^{EAayrılış} \quad (4)$$

Denklem (5) otobüs bataryalarının ulaşabileceği maksimum değerin batarya kapasitesi kadar olduğu gösterilmiştir.

$$ED_{e,t} \leq ED_e^{maksimum}, \forall e, t \quad (5)$$

Denklem (6) ve **Denklem (7)**'de sırasıyla elektrikli otobüslerin toplam şarj güçleri ve PV sistemde üretilen gücün nerede kullanıldığı ifade edilmektedir.

$$P_t^{top-şarj} = \sum_e P_{e,t}^{şarj}, \forall t \quad (6)$$

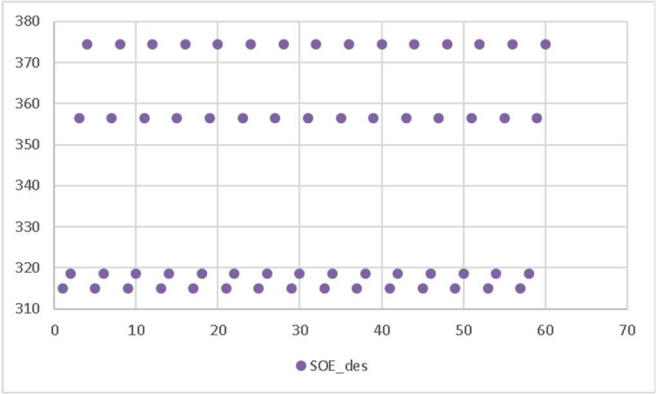
$$P_t^{PV} = P_{e,t}^{PVotobüs} + P_t^{satış}, \forall t \quad (7)$$

III. SONUÇLAR

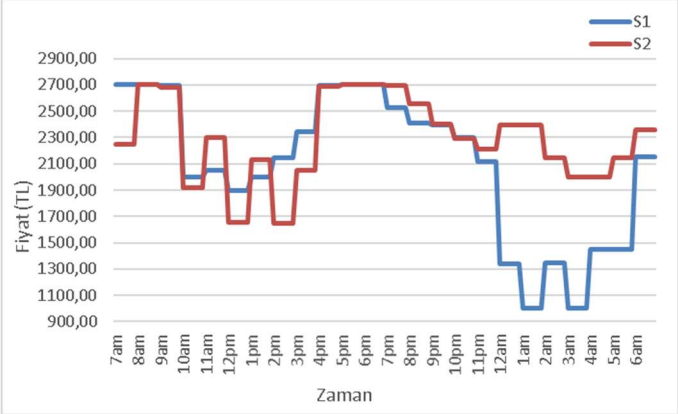
Elektrikli otobüs şarj istasyonuna 60 adet elektrikli otobüs geldiği varsayılmıştır. Otobüslerin teknik özellikleri **Tablo 1**'de gösterilmiştir. Otoparkta DC şarj gücü kullanılmakla birlikte şarj verimi %90 olarak düşünülmüştür. Bütün otobüslerin otoparka geliş, otoparktan ayrılış ve otoparka geldikleri periyottaki enerji seviyeleri farklı durumdadır. Elektrikli otobüslerin istenen şarj durumlarına ait veriler **Şekil 2**'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Elektrikli otobüslerin bataryalarının teknik özellikleri

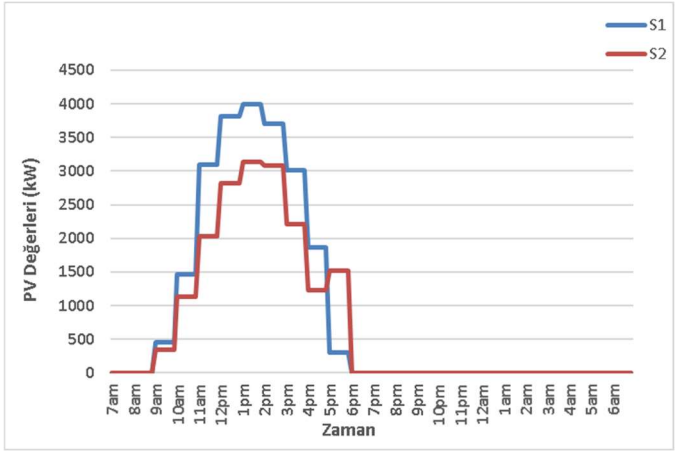
Elektrikli Otobüsler	Maksimum Batarya Kapasitesi (kWh)	Minimum Batarya Kapasitesi (kWh)	Şarj Verimliliği (%)
Yutong E11PRO	350	70	90
BYD-Alexander Dennis Enviro400EV	354	70,8	90
Mercedes eCitaro	396	79,2	90
Iveco Eway 18m	416	83,2	90



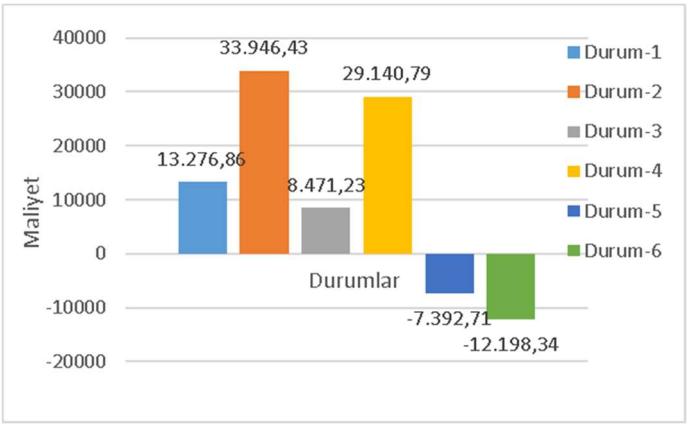
Şekil 2. Elektrikli otobüslerin bataryalarının istenen enerji miktarları



Şekil 3. 18-19 Aralık 2023 tarihli EPİAŞ Piyasa Takas Fiyatı



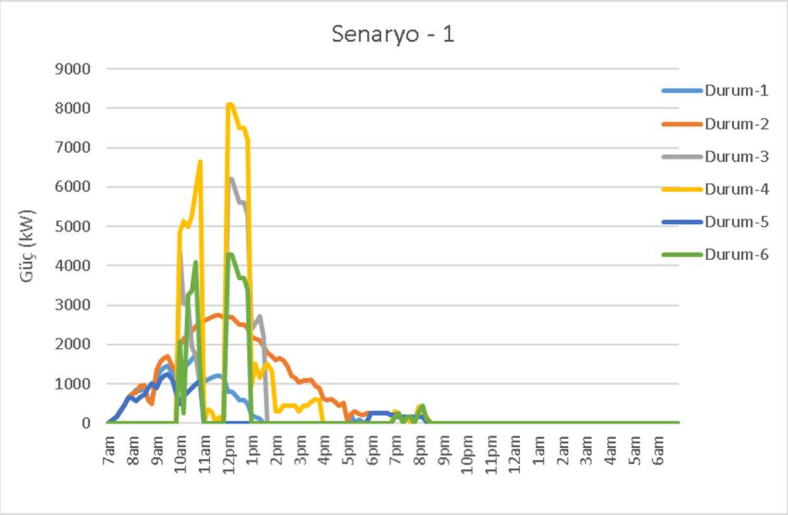
Şekil 4. 18-19 Aralık 2019 tarihli Edirne PV üretim değerleri



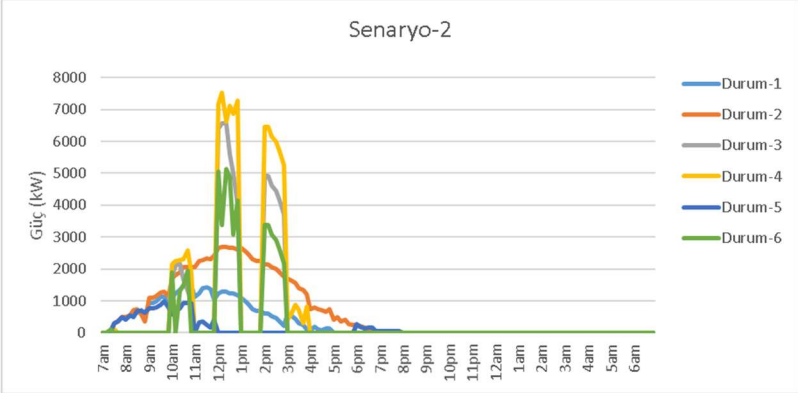
Şekil 5. Durumlara göre maliyet grafiği

Elektrikli otobüs şarj istasyonunun otobüsleri şarj edebilmek için Türkiye Elektrik Piyasası'ndan Gün Öncesi elektrik fiyatı ile elektrik enerjisi satın aldığı varsayılmıştır. Şekil 3 'te ilgili fiyat verisi gösterilmiştir. Elektrikli otobüs şarj istasyonunun Edirne ilinin merkezinde olduğu düşünülmektedir. 18-19 Aralık 2019 tarihli Edirne merkez güneş radyasyonu verisi Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 5'te her bir duruma ait maliyet verilmiştir. En yüksek maliyet PV üretiminin olmadığı ve 50kW şarjın gerçekleştiği Durum-2 de 33.946,43 TL, en kârlı iş ise Pv üretiminin 2 kat olduğu ve 150kW şarjın gerçekleştiği Durum-6 da 12.198,34 TL ile elde edilmiştir. 2. En yüksek maliyet PV üretiminin olmadığı ve 150kW şarjın gerçekleştiği Durum-4'te 29.140,79 TL ile gerçekleşmiştir. Durum-1 13.276,86 TL ile Durum-3 8.471,23 TL PV üretiminin normal seviyesinde olduğu ve sırasıyla 50kW ile 150kW şarjın gerçekleştiği durumlardır. Durum-5 ise PV üretiminin 2 kat olduğu ve 150kW şarjın gerçekleştiği durumdur ve 7.392,71 TL ile kazanç sağlamaktadır.

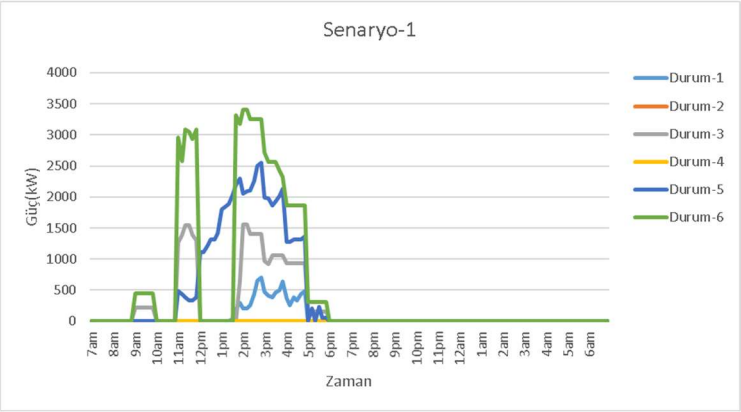


Şekil 6. 1.Senaryodaki verilere göre 6 duruma ait şebekeden çekilen güç değerleri



Şekil 7. 2.Senaryodaki verilere göre 6 duruma ait şebekeden çekilen güç değerleri

Şekil 6 ve Şekil 7'de 2 farklı senaryodaki ve 6 durumdaki şebekeden çekilen güç değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere bakıldığında 1. Senaryo için en yüksek güç değeri Durum-4'te ve en düşük güç değeri Durum-5'te verilmiştir. En yüksek güç değerinin Durum-4'te olmasının sebebi PV üretiminin olmaması ve aynı zamanda otobüslerin 150kW ile şarj edilmesi olarak açıklanabilir. Aynı şekilde en düşük güç alımının Durum-5'te olmasının sebebi de PV üretiminin normal seviyesinden 2 kat daha fazla olarak düşünülmesi ve otobüslerin 50kW ile şarj edilmesi olarak açıklanabilir. Durum-4'ü sırasıyla Durum-3 ve Durum-6 takip etmektedir bunun sebebi iki durumda da PV üretimi olmasına rağmen otobüslerin 150kW ile şarj edilmeleridir. Durum-5'i sırasıyla Durum-1 ve Durum-2 takip etmektedir. 2 durumda da otobüsler 50kW ile şarj edilmektedir. Durum-1'de PV üretimi normal seviyesinde Durum-2'de ise PV üretimi olmamaktadır. Durum-2 ve Durum-6 kıyaslandığında PV üretimi Durum-6'da iki kat olmasına rağmen otobüslerin Durum-2'de daha az güçle şarj edilmesinden dolayı Durum-6'da şebekeden daha fazla güç çektiği anlaşılmaktadır. Buraya bakıldığında şebekeden güç çekilmesi sırasında şarj gücünün PV üretiminden daha önemli olduğu anlaşılmaktadır. Aynı çıkarımlar Senaryo-2 için de geçerlidir.



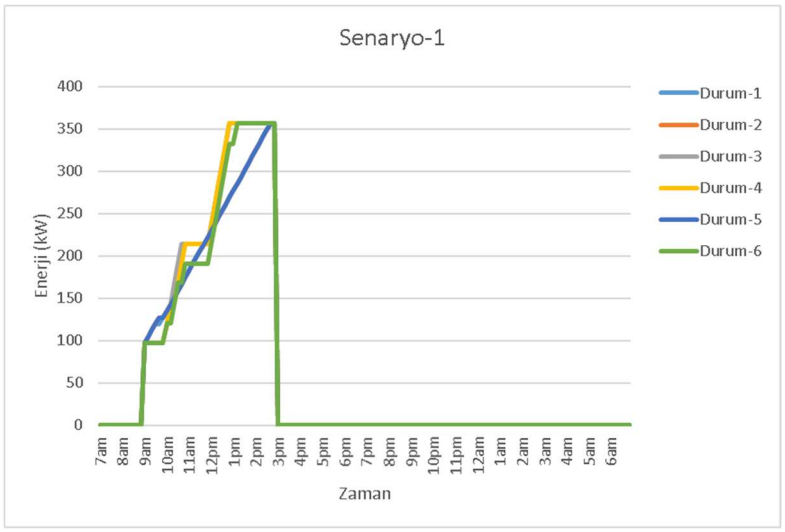
Şekil 8. 1.Senaryoya göre 6 farklı duruma ait şebekeye satılan güç değerleri



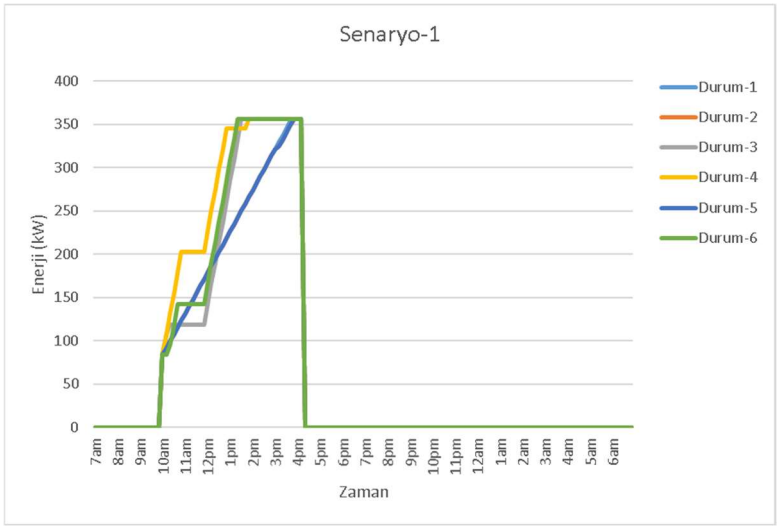
Şekil 9. 2.Senaryoya göre 6 farklı duruma ait şebekeye satılan güç değerleri

Şekil 8 ve Şekil 9'da 2 farklı senaryodaki ve 6 durumdaki şebekeye satılan güç değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere bakıldığında 1.Senaryo için en yüksek satış Durum-6'da gerçekleşmiştir. En yüksek satışın Durum-6'da gerçekleşmesinin sebebi PV üretiminin normal seviyesinden 2 kat fazla olarak düşünülmesi ve otobüslerin 150kW ile şarj edilmesidir. Durum-6'yı sırasıyla Durum-5 ve Durum-3 takip etmektedir. Durum-5'te iki kat PV üretimi ve otobüslerin 50kW ile şarj edilmesi söz konusudur. Durum-3'te PV üretimi normal seviyesindedir ve otobüsler 150kW ile şarj edilmiştir. Buraya bakıldığında PV üretim değerinin satışta daha fazla pay sahibi olduğu ortaya çıkmaktadır. Durum-3'ten sonra Durum-1 gelmektedir. Durum-2 ve Durum-4'te satış gerçekleşmemesinin sebebi de o durumlarda PV üretiminin olmaması olarak açıklanabilir. 2.Senaryo için de aynı çıkarımlar geçerlidir.

Seçilen bazı elektrikli otobüslerin şarj istasyonunda kalma süreleri ve süre boyunca içerisindeki enerji miktarları gösterilmiştir.



Şekil 10. 23 numaralı elektrikli otobüsün bataryasının enerji değişimi



Şekil 11. 55 numaralı elektrikli otobüsün bataryasının enerji değişimi

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada elektrikli otobüslerin hem şarj edilebileceği hem de park edilebileceği ve aynı zamanda şarj edilirken elektrik birim fiyatlarının ucuz olduğu saatleri seçerek maliyetin düşürülmesinin amaçlandığı bir şarj istasyonu modeli tasarlanmıştır. İstasyona 60 adet elektrikli otobüsün geldiği hem park hem de şarj edildiği varsayılmıştır. Elektrik birim fiyatları Türkiye'ye ait gerçek gün öncesi piyasasından alınmış olup PV panellerdeki güç üretimi için Edirne iline ait gerçek güneş radyasyon verileri kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre PV sistem ve DC şarj üniteleri ile elektrikli otobüslerin ekonomik işletiminin sağlanabileceği belirtilmelidir. Ayrıca önemli bir sonuç olarak şarj istasyonundan elektrik şebekesine enerji desteği de sağlanabilmektedir ki bazı durum çalışmalarında istasyonun maliyet dışında kazanç elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. 2 farklı sonuç olarak PV artışı yaşanan durumlarda maliyetin daha az olduğu ve PV sabit tutulduğunda şarj kapasitesi arttırıldığında yine maliyetin azaldığı görülmüştür. Ekonomik işletim dışında bu çalışmanın elektrikli otobüs hizmet sistemi ve şarj istasyonu kurmak isteyen kurumlara rehberlik edeceğini düşünmekteyiz. Elektrikli otobüslerin karbon salınımını azaltmasının yanında toplu taşıma ile şehirlerdeki trafik problemini de çözebileceği belirtilmelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı Zekeriya Ege HERGÜLER lisans eğitiminde almış olduğu mühendislik projesi dersi kapsamında ve Doç. Dr. Alper ÇİÇEK danışmanlığında gerçekleştirmiştir.

KAYNAKLAR

[1] M. DOĞAN, "ENERJİ KULLANIMININ COĞRAFİ ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ", Marmara Coğrafya Dergisi, sy. 23, ss. 36–52, Ekim 2013.
[2] ÇUKURÇAYIR, M. A., & SAĞIR, H. (2008). ENERJİ SORUNU, ÇEVRE VE ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARI. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi(20), 257-278.
[3] A. ŞENPINAR ve M. T. GENÇOĞLU, "YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI", (DAD), c. 4, sy. 2, ss. 49–54, 2006.
[4] M. DOĞAN, "ENERJİ KULLANIMININ COĞRAFİ ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ", Marmara Coğrafya Dergisi, sy. 23, ss. 36–52, Ekim 2013.
[5] Technology needs in long-distance transport, Int. Energy Agency, 2019, [Çevrimiçi]. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-in-long-distance-transport.
[6] F. Leach, G. Kalghatgi, R. Stone, ve P. Miles, "The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines", Transp. Eng., c. 1, 2020, doi: 10.1016/j.treng.2020.100005.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yüksek Enerjili Fırınlarda Kullanılan Yakıt Türlerinin Swot Analizi İle Seçimi

İrem Düzdar [a], Tuğçe Cihan[b], İlyas Uygur [c]

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Bölümü, Düzce/Türkiye.
[c]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: tugcee1508@gmail.com

ÖZET

Günümüzün güncel bir sorunu, dijital dönüşüm ve artan enerji ihtiyaçları doğrultusunda kullanılan yakıtlardan kaynaklı sera gazı salınımıdır. Küresel ısınmanın etkilerini daha aza indirmek için dünya genelinde birçok önlemler alınmaktadır. Bu kapsamda, yüksek ısı gerektiren endüstriyel fırınlarda kullanılan yakıtların, özellikle CO_2 salınımının yoğun olan sanayi bölgelerindeki etkileri üzerine çalışmalar yapmak önem kazanmıştır. Bu nedenle çözüm olarak, yeşil dönüşüme olanak sağlayan ve teknolojik olmasının yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrojen kullanımı hedeflenmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının en önemli nedeni karbon ayak izini minimize etme potansiyeline sahip olmasıdır.

Bu çalışmada, geleneksel ve yenilenebilir yakıtlar SWOT yöntemi yardımıyla değerlendirilmiştir. Bu analiz, çevresel faktörler, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve ekonomik faktörleri içerecek şekilde kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Ayrıca, doğalgaz, elektrik ve LPG gibi olağan yakıtların dışında hidrojen kullanılması durumunda oluşabilecek CO_2 salım miktarları, üretim miktarları ve potansiyel sorunlar karşılaştırılarak çevresel faydalar belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, SWOT, Yakıt, CO_2

Selection of Fuel Types Used in High Energy Furnaces with SWOT Analysis

İrem Düzdar [a], Tuğçe Cihan[b], İlyas Uygur [c]*

[a] Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Düzce/Turkey.
[b] Düzce University, Institute of Postgraduate Education, Department of Composite Material Technologies, Düzce/Turkey.
[c] Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Düzce/Turkey.
* **Corresponding Author: tugcee1508@gmail.com**

ABSTRACT *(Cambria, 10)*

The current problem of today, in the context of digital transformation and increasing energy demands, stems from greenhouse gas emissions associated with the use of fuels. Many measures are being taken worldwide to mitigate the effects of global warming. In this context, research on the effects of fuels used in industrial furnaces requiring high heat, especially in regions with intense CO_2 emissions, has become important. Therefore, the use of hydrogen, a renewable energy source that enables green transformation it is being technological, is targeted as a solution. One of the most important reasons for using hydrogen as a fuel is its potential to minimize carbon footprint.

In this study, conventional and alternative fuels are evaluated using the SWOT method. This analysis provides a comprehensive assessment that includes environmental factors, renewable energy, energy efficiency, and economic factors. Additionally, by comparing

the CO_2 emission levels, production quantities, and potential problems that may arise from the use of hydrogen in addition to conventional fuels such as natural gas, electricity, and LPG, environmental benefits will be determined.

Keywords: Renewable energy, SWOT, Fuel, CO_2

I. GİRİŞ

Günümüzde, artan sera gazı salınımı ve küresel ısınmanın etkileri, çevresel sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Hızla gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyaçları, kullanılan enerji kaynaklarının ozon tabakasına zarar verme eğilimini artırmaktadır [1]. Bu nedenle, küresel olarak sera gazı salınımının azaltılmasına yönelik önlemler ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi çabaları hız kazanmaktadır. Bir sanayi sektöründeki uzmanlarla yapılan görüşmelerden elde edilen verilere dayanarak dört alternatif yakıt belirlendi bunlar; LPG, elektrik, doğal gaz ve hidrojendir. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), normal sıcaklıkta renksiz ve kokusuz bir gaz olan, çoğunlukla propan ve bütan olmak üzere çeşitli hidrokarbon moleküllerinin bir karışımıdır. LPG temiz bir enerji kaynağıdır ve çoğunlukla doğalgaz ve petrol üretiminden elde edilir. Doğal gaz ve metan elektriği oluşturan hidrokarbonlara örnektir. Geniş bir enerji yoğunluğuna ve yüksek yanma verimliliğine sahiptir. Doğal gaz, esas olarak metandan (%97) ve çeşitli küçük miktarlardaki diğer yüksek alkanlardan oluşan gaz halindeki hidrokarbonların doğal olarak oluşan bir karışımıdır. Hidrojen, yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su üreten temiz bir yakıttır. Hidrojen, doğal gaz, nükleer enerji, biyokütle gibi çeşitli yerli kaynaklardan ve güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerjilerden üretilebilmektedir. Standart sıcaklık ve basınç altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı ve H_2 olarak bulunan diatomik bir gazdır[1,2],

Bu çalışmada, hidrojen kullanımının ekonomik, verimlilik, güvenlik ve çevresel temizlik açılarından faydaları analiz edilecektir. Bu çalışma, enerji kullanımında çevresel etkileri azaltmaya yönelik bir adım olarak kabul edilirken, sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluklar konusunda katkı sağlamayı da hedeflemektedir. Çalışma, enerji kaynaklarının hidrojen ile değiştirilmesinin sektördeki etkilerini SWOT analizi ile belirlemeyi amaçlamakta ve bu bağlamda giriş, endüstriyel süreçler, enerji kaynakları, değerlendirme yöntemleri, teknoloji gelişimi ve sürdürülebilirlik konularını içeren bölümlere ayrılmıştır. Sonuçlar ve öneriler, çalışmanın final bölümünü oluşturarak, enerji kullanımındaki çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilirlik konusunda ilerleme sağlama amacını taşımaktadır [1,2].

I. MATERYAL METOT

Materyal ve metot bölümü aynı zamanda enerji kaynaklarının hidrojen ile değiştirilmesinin sektörel etkilerini değerlendirmek amacıyla SWOT analizini içermektedir. Bu analiz, çalışmanın içeriğini giriş, endüstriyel süreçler, enerji kaynakları, değerlendirme yöntemleri, teknoloji gelişimi ve sürdürülebilirlik gibi alt başlıklara ayıran bir çerçeve sunacaktır.

1. Problemin Tanıtılması

Bu çalışmada yüksek enerjili fırınlarda kullanılan yakıtların karşılaştırılmaları yapılarak hangi yakıtın daha kullanışlı olacağının SWOT analizi yaparak belirlenmiştir[3].

2. Seçim Kriterlerinin Belirlenmesi

İşletmelerin yakıt seçimi probleminde kullanılacak kriterlerin belirlenmesi için seçim kriterleri ile ilgili literatür taraması ve uzman görüşleri sonunda yakıt seçimi ve değerlendirilmesinde kullanılan en popüler kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler içerisinde işletmenin Endüstri Mühendisi, Enerji Mühendisi, Ar-Ge Mühendisi ile yapılan görüşme sonucunda yakıt seçiminde kullanılacak kriterler: çevresel kriterler, ekonomik kriterler (geçmiş veriler), sosyal ve politik kriterler ve teknik kriterler olarak belirlenmiştir. Bu ana kriterlerin alt kriterleri tanımlanmıştır[3,4].

2.1 Çevresel Kriterler

Küresel ısınmanın nedenlerinin başında petrol, kömür ve doğal gaz türünden fosil yakıtların kullanılmasıyla atmosfere karışan karbondioksit gazının çok hızlı artışı gelmektedir. Uzun yıllar boyunca kullanılan fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri "çevre felaketi" olarak adlandırılabilecek boyutlara ulaşmıştır. Bu yüzden çevre kirliliğinin azaltılmasını sağlayacak önlemlerin başında CO_2 salımının önlenmesi gelmektedir. Tanım olarak çevresel etki; planlanan faaliyetlerin çevreye olabilecek olumlu ya da olumsuz etkilerin tümüne denilmektedir.[3,4]

2.2 Ekonomik Kriter/ Geçmiş Veriler

Maliyet, her yatırımın değerlendirilmesinde öncelikli bir faktördür. Yatırımcının zarar etmemesi için, yatırımın başlangıç maliyetinin geri dönüş süresi kısa olmalı ve işletme maliyetleri, işletme gelirinden daha düşük olmalıdır. Enerji, genel olarak bir şeyin etkili bir şekilde iş yapabilme yeteneğini ve kapasitesini ifade eder, bu da bir sistemin kendisiyle veya diğer sistemlerle etkileşimde bulunabilme yeteneğini içerir. Enerji verimliliği hesaplayabilmemiz için geçmiş dönem enerji tüketimleri hakkında bilgi sahibi olmamız gerekmektedir. [3,4]

2.3 Sosyal ve Politik Kriterler

Kullanacağımız alternatifi belirlerken alternatifimizin yürürlükteki hükümet politikalarına uygunluğu parasal ve sosyal açılardan önemlidir. Hükümetlerin enerji kaynakları konusunda birçok teşviki olabilmektedir. Kamu kabulü, toplum tarafından kabul edilirlik düzeyini gösteren bir parametre olarak önem verilmesi gereken bir hedeftir[3,4].

2.4 Teknik Kriterler

Kullanılan hammaddenin fırın içerisinde istenen ısı değerine ulaşması ve istenen ısı değerinde istikrarlı olması beklenmektedir. Bunun nedeni fırın ömrünün olabildiğince uzun olması hedeflenmektedir. Kullanılacak hammaddenin fırın yapımında kullanılan maddelerde ters etki yapması istenmeyen bir durumdur. Bu istenmeyen durumlarda oluşabilecek aksaklıklar üretilen ürün için kalitesizliğe sebep olmaktadır. İhtiyaçları karşılayamama durumunda kullanılmasının bir manası olmayacaktır. Sürdürülebilirlik yaklaşımı, kalkınma ve çevrenin birbirleriyle çatışmayan kavramlar olduğunu öne süren bir anlayıştır. Burada amaçlanan oluşan sistemin benimsetilmesi ve devamlılığının sağlanmasıdır. Yeni kullanılacak hammaddenin fırın için ve üretilecek ürün için uygun olmasıdır. Ürünün yapısını olumsuz etkileyebilecek elementler içermesi istenmeyen durumlar ortaya çıkarabilir. Yeni kullanılacak hammadde için kurulacak üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu bakım onarım sıklığıdır. Gerektiği kadar (ne fazla ne az) yapılan bakım arıza riskini azaltır ve enerji tüketimi açısından azalma sağlar [5].

3. Alternatiflerin Belirlenmesi

Bir endüstri dalında bulunan uzmanlar ile görüşmeler sonucu alınan bilgiler doğrultusunda 4 adet alternatif yakıt bulunmaktadır. Belirlenen alternatif yakıtların detaylı açıklamaları şu şekildedir.

3.1. LPG (Sıvı Petrol Gazı): LPG, propan ve bütan gibi hidrokarbonlardan oluşan bir gaz karışımıdır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve genellikle taşınabilir ve depolanabilir. LPG'nin yanması, karbon dioksit (CO_2) ve su buharı gibi atıklar üretir.

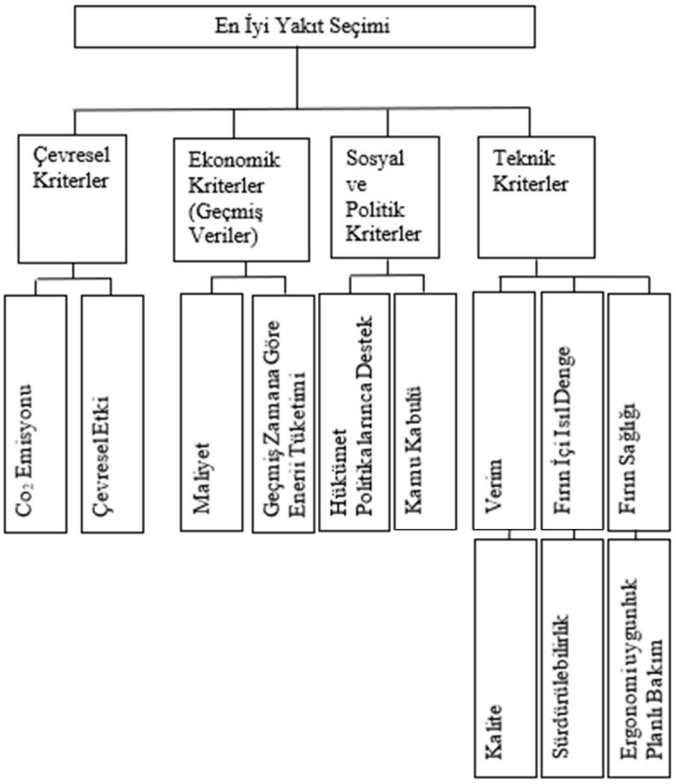
3.2. Doğalgaz: Doğalgaz, metan gibi hidrokarbonlardan oluşan bir gazdır. Yüksek yanma verimliliğine sahiptir ve geniş bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Doğalgazın yanması sonucu atmosfere daha az kirlilik ve karbon emisyonu salınır.

3.3. Elektrik: Temelde yük taşıyan bir enerji biçimidir. Atom altı parçacıkların (örneğin, elektronlar) hareketiyle ortaya çıkan bir enerji formudur. Elektrik, doğada birçok şekilde üretilebilir ve kullanılabilir. Örneğin, güneş ışığı fotovoltaik hücrelerde elektrik enerjisine dönüştürülebilir, rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirebilir veya hidroelektrik santralleri su akışıyla elektrik üretebilir.

3.4. Hidrojen: Hidrojen, renksiz, kokusuz ve yanıcı bir gazdır. Temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilir çünkü yanması su buharı (H_2O) üretir. Hidrojenin üretimi genellikle elektroliz veya reformasyon gibi devam eder.

Bu yakıt türleri, enerji yoğunluğu, parlaklık etkileri, taşınabilirlik ve ekonomik faktörler gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilir. Seçim, kullanım amacına, genişlemeye, enerji yoğunluğuna ve sürdürülebilirliğe bağlı olarak değişebilir [3,4,5].

1. Aşama: Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Oluşturulan hiyerarşik yapı aşağıda verilmiştir



Şekil 1: Yakıt Seçiminde Kullanılan Kriter ve Alt Kriterler

A. SWOT ANALİZİ

SWOT analizi, bir organizasyonun veya bir projenin içsel güçlü ve zayıf yönleri ile dışsal fırsatlar ve tehditleri değerlendiren bir stratejik planlama aracıdır. SWOT, İngilizcede "Strengths" (Güçlü Yönler), "Weaknesses" (Zayıf Yönler), "Opportunities" (Fırsatlar), ve "Threats" (Tehditler) kelimelerinin baş harflerini temsil eder. Bu analiz, bir organizasyonun iç ve dış çevresini anlamak, stratejik hedefler belirlemek ve rekabet avantajı elde etmek için kullanılır [6].

SWOT analizi genellikle aşağıdaki adımları içerir:

1. *Güçlü Yönler (Strengths):*

Organizasyonun veya projenin içsel avantajları ve başarıları listelenir. Bu güçlü yönler, rekabet avantajı sağlayan unsurları temsil eder.

2. *Zayıf Yönler (Weaknesses):*

Organizasyonun veya projenin içsel kısıtlamaları, eksiklikleri veya gelişmeye açık alanları belirlenir. Zayıf yönler, iyileştirme fırsatlarına işaret eder.

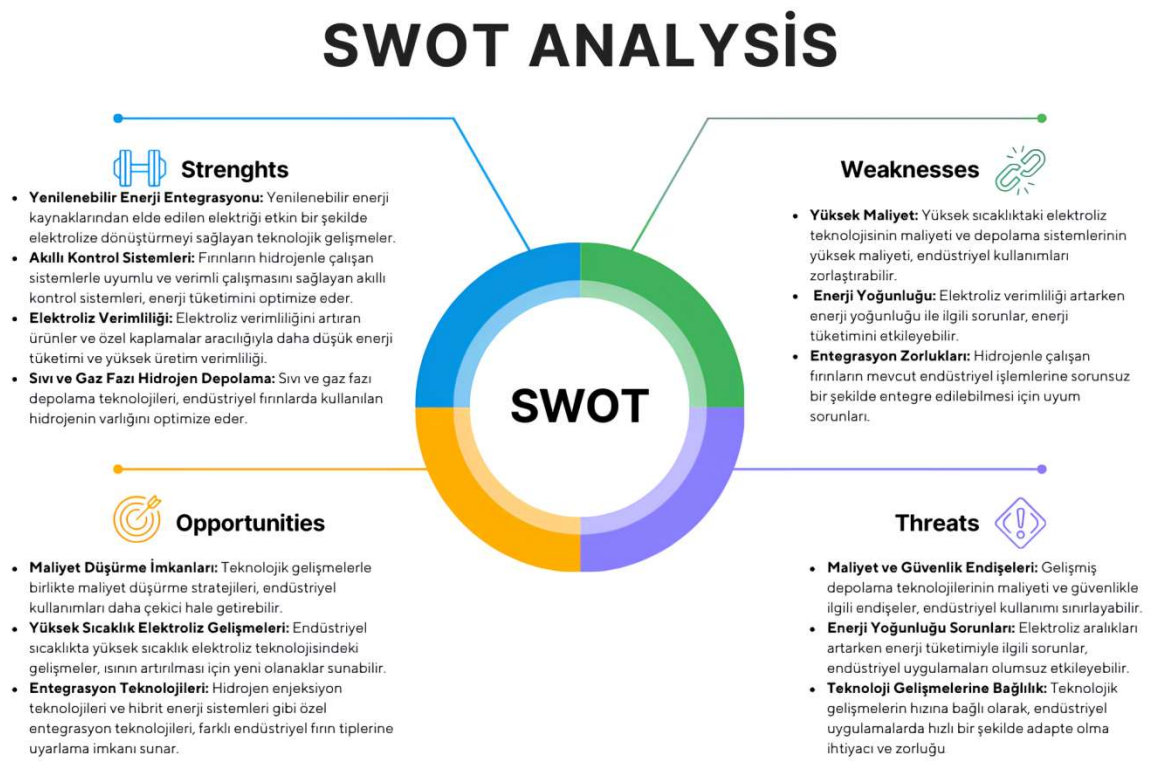
3. *Fırsatlar (Opportunities):*

Organizasyonun veya projenin dış çevresindeki olumlu koşullar ve gelişmeler listelenir. Fırsatlar, büyüme, genişleme veya stratejik avantaj elde etme olanaklarını ifade eder.

4. Tehditler (Threats):

Organizasyonun veya projenin dış çevresindeki olumsuz faktörler ve potansiyel sorunlar belirlenir. Tehditler, riskler ve mücadele gerektiren zorlukları temsil eder.

SWOT analizi, organizasyonların mevcut durumlarını değerlendirerek stratejik bir perspektif kazanmalarına yardımcı olur. Bu analiz, organizasyonların kendi içsel dinamiklerini anlamalarına ve dış çevrelerindeki değişkenlere karşı hazırlıklı olmalarına katkı sağlar [6,7]. Şekil 2'de verildiği gibi hidrojen, elektrik, LPG ve doğalgaz güçlü ve zayıf yönler karşılaştırılmış olup fırsat ve tehditler belirlenmiştir.



Şekil 2: SWOT Analizi

II. SONUÇLAR

Bu çalışma, endüstriyel fırınlarda kullanılan enerji kaynaklarının çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla SWOT analizi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın odağında, doğalgaz, elektrik, LPG ve hidrojen gibi enerji kaynaklarının emisyon miktarları, üretim ve çevresel etkileri üzerindeki etkilerini karşılaştırılmıştır.

SWOT analizi, hidrojen yakıtının sektördeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Hidrojenin avantajları, ekonomik, verimlilik, güvenlik ve çevresel temizlik açılarından belirgin olarak öne çıkmaktadır. Bu, hidrojenin endüstriyel fırınlarda kullanılması durumunda sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk açısından olumlu bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, SWOT analizi, endüstriyel fırınlarda kullanılan enerji kaynakları arasında tercih yaparken hidrojenin öne çıktığını göstermektedir. Hidrojenin olumsuz çevresel etkileri azaltma, ekonomik faydalar sağlama ve sürdürülebilir bir enerji seçeneği sunma potansiyeline vurgu yapmak, enerji sektöründeki dönüşüm süreçlerinde önemli bir adım olabilir.

III. TARTIŞMA

Bu çalışmada, endüstriyel fırınlarda kullanılan enerji kaynaklarının çevresel etkilerini değerlendirmek için SWOT analizi kullanıldı. Sonuçlar, hidrojenin diğer enerji

kaynaklarına göre çevresel açıdan daha uygun bir seçenek olduğunu belirtmektedir. Bu noktada, hidrojenin çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması ve endüstride enerji dönüşümünü teşvik etmesi önemlidir.
Enerji tüketiminde çevresel etkileri azaltma hedeflerine ulaşma çabalarında hidrojenin öne çıkan bir aday olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hidrojenin endüstriyel süreçlerde kullanılmasıyla birlikte, işletmelerin çevresel sorumluluklarına daha etkin bir şekilde yanıt verme potansiyeli de artmaktadır [7].

SWOT analizi, hidrojenin ekonomik, verimlilik, güvenlik ve çevresel temizlik açılarından güçlü yönlerini vurgulamıştır. Ekonomik açıdan, hidrojenin potansiyel maliyet avantajları ve sürdürülebilir enerji pazarındaki büyüme fırsatları işletmelere çekici bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, güvenlik ve çevresel temizlik avantajları, hidrojenin endüstriyel uygulamalarda kullanımının daha yaygın hale getirilmesi için bir dayanak noktası olabilir. Bu sonuçlar, enerji sektöründe çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik etkinliği birleştiren bir çözüm arayışındaki işletmeler için önemli bir rehberlik sunmaktadır. Hidrojenin kullanımının artırılması, sadece enerji sektöründeki karar vericileri değil, aynı zamanda çevresel hedeflere ulaşma çabalarında önemli bir rol oynayan endüstrileri etkileyebilir. Ancak, bu dönüşüm sürecinde dikkat edilmesi gereken potansiyel zorlukları ve riskleri değerlendirmek de önemlidir[7,8]

IV. ÇIKARIM

SWOT analizi, endüstriyel fırınlarda kullanılan enerji kaynakları arasında hidrojenin öne çıktığını ve çeşitli avantajlar sunarak enerji sektöründeki dönüşüm süreçlerine katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu çıkarımlar, enerji sektöründe çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa etme yolunda atılan önemli bir adımdır.

KAYNAKLAR

[1] H. Naci Bayraç. "Enerji Kullanımının Küresel Isınmaya Etkisi ve Önleyici Politikalar' Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi,11(2), 2014.
[2] A. Başoğlu "Küresel İklim Değişikliğinin Ekonomik Etkileri Üzerine Model Denemesi ve Ekonometrik Bir Analiz" *Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı Doktora Tezi,* Haziran, 2014
[3] G. Akın. "Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları," *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi 46, 2 (2006) 29-43*.
[4] B. Yüksel, K. Yüksel, "Türkiye'de Yenilenebilir Enerjinin Önemine SWOT Analizi Yöntemi İle Gelecek Perspektifli Bir Bakış,"1. Uluslararası Avrasya Enerji Sorunlar Sempozyumu, 2015.
[5] E. Acar, "Ar-Ge Projesi Seçim Problemi- Cam Sektöründe Bir Uygulama" Düzce Üniversitesi Lisans Bitirme Tezi, 2023
[6] *2021 yılı TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Genel Raporu*
[7] M. F. Ballı, " Tav Fırınlarında Kok Gazı Yerine Doğalgaz Kullanımının Ekonomik ve Çevresel Sürdürülebilirlik Analizi" Karabük Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 2021.
[8] Ş. Tüysüz, A. Öncel, "Türkiye'de Yeşil Ekonomi Açısından Sürdürülebilir Enerji Kaynaklarının SWOT Analizi" İktisadi İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi,E-ISSN: 2564-7466,Cilt:7, Sayı:19, Ekim 2022

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

YouTube Trend Video Büyük Veriseti Üzerinde Videoların Son Gün İzlenme Sayılarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Tahmini

Yesim Dokuz[a*]

[a]Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** ytorun@ohu.edu.tr

ÖZET

YouTube, diğer video içerik platformları arasında en popüler video içerik platformlarından biridir ve çok sayıda kullanıcı, birçok izleyiciye ulaşma potansiyeli ve teknik olarak yeterli altyapı gibi birçok faydası bulunmaktadır. Bu faydalarıyla, video içerik üreticileri videoları için YouTube platformunu kullanmaktadır. YouTube, yüklenen videoları analiz eder ve görüntülenme sayıları, beğeni sayıları ve diğer metrikler temelinde günlük popüler videoları listeler. YouTube Trend Video Büyük Veriseti, on bir ülkenin günlük popüler videolarına dayanarak oluşturulmuş olup her bir popüler videonun video kimliği, başlık, etiketler ve görüntülenme-beğeni-beğenmeme-yorum sayıları gibi çeşitli parametrelerini içermektedir. Bu çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri'ne ait Trend Video Büyük Veriseti kullanılarak, YouTube'un günlük popüler videolarının son gün görüntülenme sayısının makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tahmini yapılmıştır. Rastgele Orman (RO), Doğrusal Regresyon (LR) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) olmak üzere üç makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve son gün görüntülenme sayısı, ilk, ikinci ve üçüncü günlerin görüntülenme sayılarına dayanarak tahmin edilmiştir. Sonuçlar, kullanılan algoritmaların videoların son gün görüntülenme sayısını başarıyla tahmin edebildiğini göstermektedir (RO=%92, LR=%82, YSA=%93).

Anahtar Kelimeler: *Makine öğrenmesi, Video izleme sayısı tahmini, YouTube analizi, YouTube Trend Video Büyük Veriseti*

Prediction of Final Day View Count of Videos on YouTube Trending Video Big Dataset using Machine Learning Algorithms

ABSTRACT

YouTube is one of the most popular video content platform among other video content platforms with its many benefits, such as huge number of users, high potential to reach many audiences, and technically sufficient background. With its benefits, video content producers use YouTube platform for their videos. YouTube analyzes uploaded videos and lists daily trending videos based on their view counts, like counts, and other metrics. YouTube Trending Video Big Dataset is generated based on daily trending videos of YouTube for eleven countries and contains several parameters of each trending video, such as video ID, title, tags and view-like-dislike-comment counts. In this study, Trending Video Big Dataset of United States is used for prediction of final day view count of trending videos using machine learning algorithms. Three algorithms are utilized, i.e. Random Forest (RF), Linear Regression (LR), and Artificial Neural Networks (ANN), and final day view count is predicted based on view counts of first, second, and third days. The results show that the utilized algorithms could successfully predict final day view count of videos (RF=%92, LR=%82, ANN=%93).

Keywords: *Machine learning, Video view count prediction, YouTube analytics, YouTube Trending Video Big Dataset*

I. INTRODUCTION

Recently, video sharing became more prevalent with the utilization of smartphones and tablets. People share their personal updates, follow content producers, and even learn something from the videos which someone else uploaded. YouTube is one of the most popular video content platforms among other

alternatives in the world based on its many benefits [1]. Users utilize YouTube because of its huge number of users, high potential to reach many audiences, and technological background [2]. With these advantages, YouTube is a very large data source to analyze.

Analyzing YouTube big data sources would provide many benefits. First of all, as a result of high number of video content producers, YouTube is main source of video content from all over the world which provides multilingual datasets from YouTube. Second, video contents could be analyzed for many purposes, such as extremism detection, segmentation, and topic detection. Third, video comments would provide many insights for discovering keyword-related results and extract sentiments from comments. Fourth, YouTube trending video lists for countries would provide meaningful information about preferences of country YouTube users.

However, analyzing YouTube big datasets have several challenges. Video content analysis and video segmentation are difficult problems and novel methods are required to solve such problems. Video comment analysis has its own challenges, such as free format word usage, abbreviations, subjective comments, and irony in comments. YouTube trending video list mining is an emerging problem which requires novel methods to solve new problems.

In the literature, several studies are present for YouTube trending video big data mining. Brodersen et al. [3] examined the correlation between the popularity and location of YouTube videos to see if the videos had a particular regional focus. Figueiredo et al. [4] proposed a framework for YouTube, which established new measures and suggested two-step learning method for early popularity trend prediction of user-generated content. Diddeniya et al. [5] analyzed trending YouTube videos of Sri Lanka to extract knowledge about trending videos. Andry et al. [6] utilized different data mining algorithms for prediction of YouTube videos whether they would be in trending list using several parameters. Manikandan et al. [7] utilized machine learning regression algorithms to predict view count of YouTube trending videos using other related parameters, such as likes, dislikes, category, country, and trending date. Halim et al. [8] proposed an artificial intelligence technique for features selection in YouTube videos to discover features that influence videos, and to predict videos of being trending or not. Dokuz [9,10] proposed YouTube trending video big data analysis algorithms to discover popular and persistent tags.

In this study, a new method is proposed for final day view count prediction of YouTube trending video big dataset, which utilizes machine learning algorithms. Three machine learning algorithms are utilized, i.e. Random Forest (RF), Linear Regression (LR), and Artificial Neural Networks (ANN), and final day view count is predicted based on view counts of first, second, and third days. The experimental results on trending video big dataset of United States show that machine learning algorithms could successfully predict final day view count with a high accuracy.

II. Material And Method

In this section, first YouTube trending video big dataset is introduced and then proposed video view count prediction method is presented. Finally, the utilized machine learning algorithms are introduced.

A. YouTube Trending Video Big Dataset

In this study, YouTube Trending Video Big Dataset is used which has daily trending videos since 12 August 2020 [11]. The original dataset contains information about daily trending videos for 11 different countries, including US trending videos. In the dataset, there are 16 parameters present for each video, such as, video ID, title, publish date, trending date, category ID, tags, view count, like count, dislike count, and comment count. For each day, up to 200 trending videos are present for each country dataset. Also, the category information of each video is present, including Film & Animation, Autos & Vehicles, Music, Travel & Events, and Gaming. 32 different categories are present in the dataset, 15 of which are actively used and exist in the dataset.

In this study, the dataset that corresponds to United States trending videos (The US dataset) is selected for video view count prediction. The total number of videos for US trending videos dataset is 239650 from August 2020 to November 2023. However, many of the videos are present in the dataset recurrently. When the videos are listed in trending videos list, then the videos are present at least 2 or 3 days. We excluded the videos that are listed in trending videos list less than 5 days. We extracted Video IDs and view counts of videos for first day, second day, third day and final day. Three datasets were generated which were presented in Table 1. The number of records for all three datasets is 33025.

Table 1. Generated datasets

Dataset	Parameters	Outcome
D1	Video ID First day view count	Final day view count
D2	Video ID First day view count Second day view count	Final day view count
D3	Video ID First day view count Second day view count Third day view count	Final day view count

B. Video View Count Prediction

In this study, four popular machine learning algorithms were utilized for video view count prediction, i.e. Random Forest (RF), Linear Regression (LR), Artificial Neural Networks (ANN), and Support Vector Machines (SVM). These algorithms are powerful classification algorithms which could also be used for regression problems, such as video view count prediction. The algorithms were run on all three generated datasets and final day view counts were predicted. The flowchart of this study is presented in Figure 1.

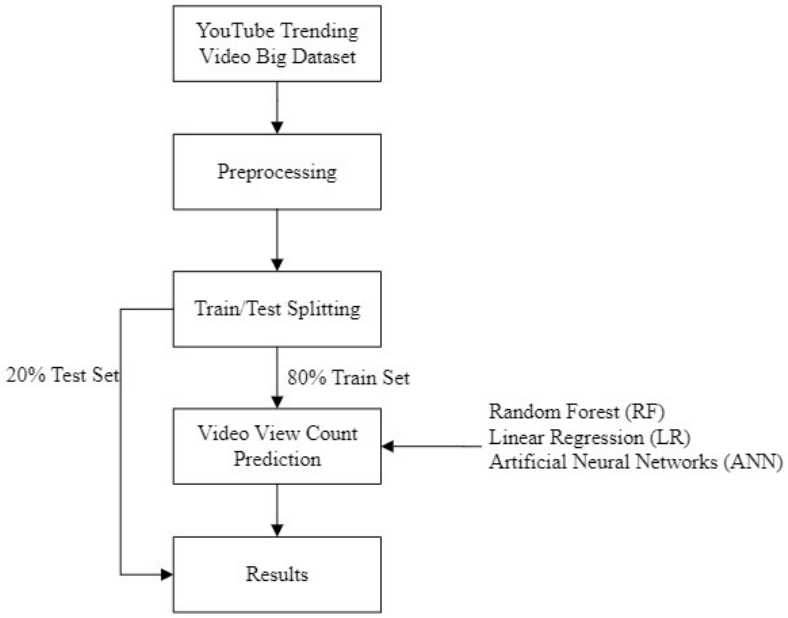


Figure 1. Flowchart of the proposed method

As can be seen in Figure 1, at the first step, the dataset is read into memory. At the second step, preprocessing steps are applied, such as excluding irrelevant columns, extracting view counts of each video for all days, and exclusion of videos that are present in the dataset less than 5 days. At the third step, the dataset is split into train and test sets, i.e. 80% of the dataset is selected as train set and 20% of the dataset is selected as test set. At fourth step, the dataset is given to the algorithms and final day view count predictions of the videos are extracted. Finally at the fifth step, the predictions of the algorithms are compared with the real values of test set and performance metrics of the algorithms are evaluated.

C. Utilized Algorithms

In this study, three machine learning algorithms are utilized for video view count prediction, i.e. Linear Regression (LR), Random Forest (RF), and Artificial Neural Networks (ANN).

Linear Regression (LR) is a statistical machine learning algorithm which tries to fit one line between independent variables and dependent variable [12]. The generated line is linear from start of the dataset to the end. LR would be beneficial where the data distribution is linearly expectable.

Random Forest (RF) is a decision tree classification algorithm based on ensemble learning model, in which more consistent results are obtained by using more than one decision tree which is introduced by Breimen [13]. In RF, more than one decision tree is constructed by using some of the parameters, and the

results are gathered together to obtain one final result for each record. In this study, RF algorithm is utilized with the number of trees of 100.

Artificial Neural Networks (ANN) is a machine learning method which is inspired of human brain learning model by establishing artificial neurons and providing connections between these neurons [14]. A classical ANN model is composed of three layers: the input, the hidden, and the output. In this study, ANN is utilized with one hidden layer.

III. Results

In this section, the results related to video view count prediction based on machine learning algorithms on YouTube Trending Video Big Dataset is presented. First, the performances of machine learning algorithms for final day view count prediction of YouTube videos are presented. Then, the real and predicted values of each algorithm is presented.

Table 2. R^2 values of algorithms for the datasets

Dataset	LR		RF		ANN	
	R^2	MAE	R^2	MAE	R^2	MAE
D1	0,7278	1161122	0,7088	1287135	0,7753	1259128
D2	0,7278	1161122	0,9038	627399	0,9285	822946
D3	0,7278	1161122	0,9258	444016	0,9326	631386

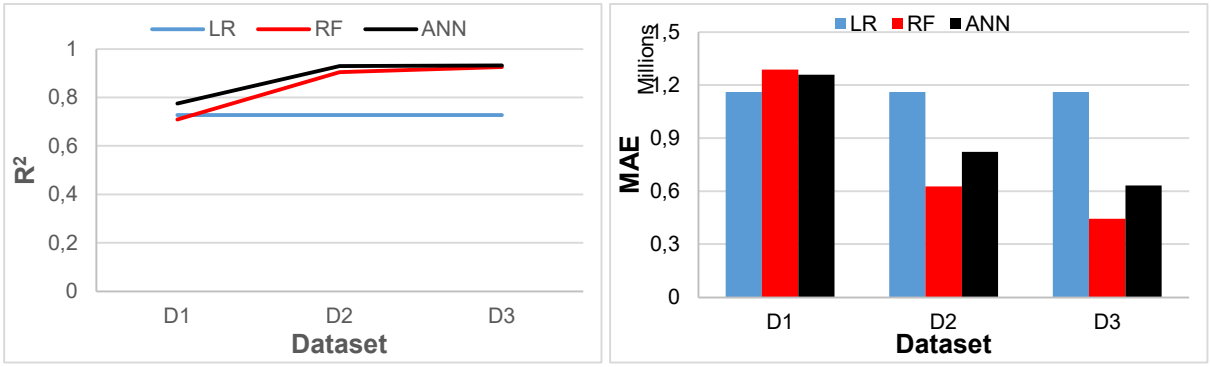


Figure 2. R^2 and MAE values of utilized algorithms

Table 2 and Figure 2 present the performance metrics of machine learning algorithms for video final day view count prediction. As can be seen in the table, the performances of the algorithms are observed as successful based on R^2 values. Especially RF and ANN algorithms have very good R^2 value for D2 and D3 datasets. Also, the table shows that when we feed more days of view counts, the prediction performances of machine learning algorithms could be higher.

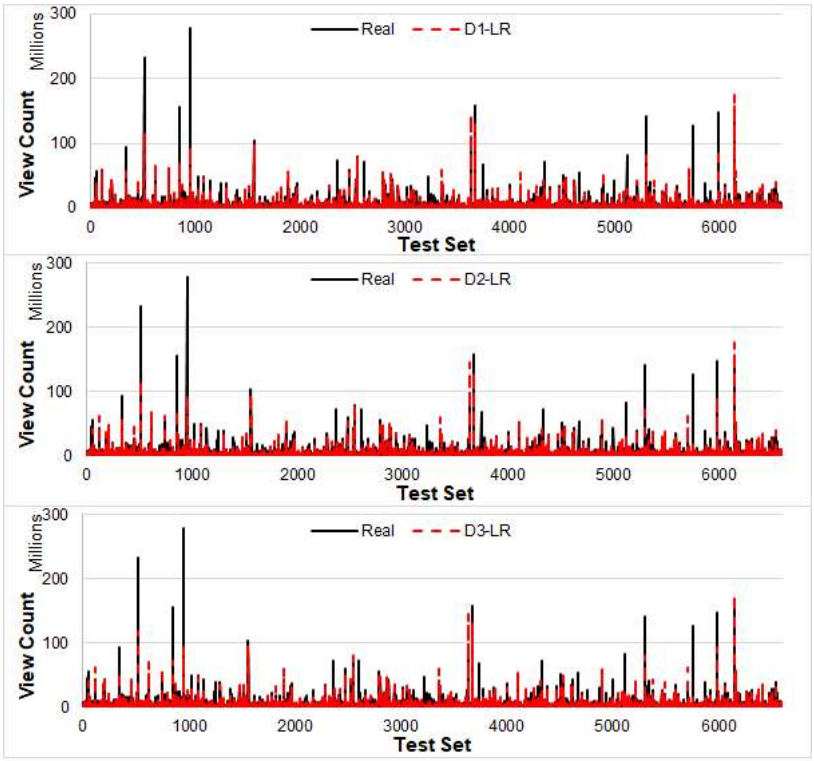


Figure 3. Real test values and LR predictions for three different datasets

Figure 3 presents real test values and LR predictions for three proposed datasets. As can be seen in the figure, in all datasets, the algorithm generally could predict view count values. However, the algorithm could not handle some of the view count values from both highest and average values. Also, the results for all of the datasets are same which means that LR could not increase performance with respect to the addition of new parameters.

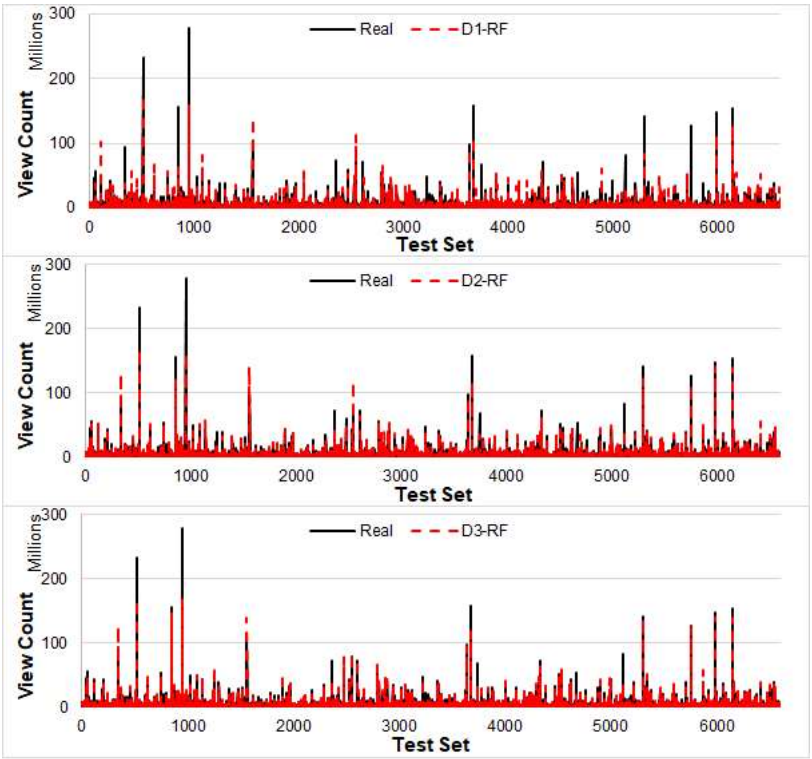


Figure 4. Real test values and RF predictions for three different datasets

Figure 4 presents real test values and RF predictions for three proposed datasets. As can be seen in the figure, in D1, the algorithm could not handle highest view count values. Some values are predicted lower, and some values are predicted as higher than real values. D2 and D3 datasets have better performance related to D1 dataset. RF could predict view count values for D2 and D3 datasets more successfully.

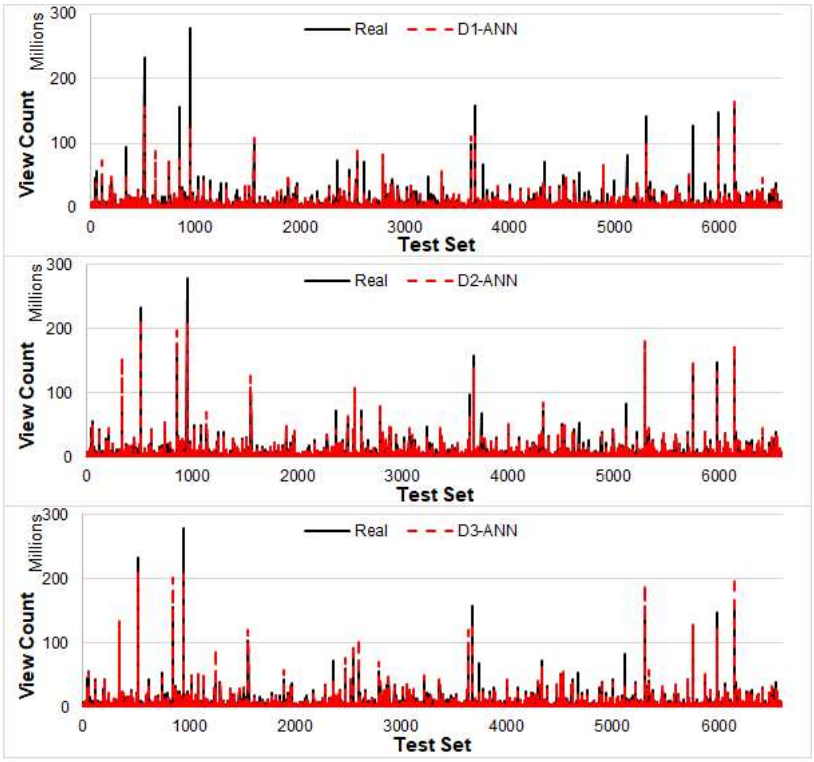


Figure 5. Real test values and ANN predictions for three different datasets

Figure 5 presents real test values and ANN predictions for three proposed datasets. As can be seen in the figure, similar with RF, ANN has lower prediction performance in D1 dataset. The algorithm could not handle highest view count values for D1 dataset. D2 and D3 datasets have better performance related to D1 dataset, which means that addition of second and third day view counts into the dataset has impact on obtaining better prediction performance.

IV. Discussion

In this study, the evaluation of the performances of machine learning algorithms on video view count prediction is performed. The results show that, utilized algorithms of LR, RF, and ANN are successful on prediction of final day view counts of videos based on first-, second-, and third-day video view counts. When the results of the algorithms are compared, LR could not improve performance when daily view counts of more days are given to the algorithm, however RF and ANN could improve their prediction performances when daily view counts of more days are given. Also, the results show that R^2 values of RF and ANN has a good performance, especially for D2 and D3 datasets.

For the future studies, final day view count prediction could be performed with utilizing more parameters, such as like count, like/dislike ratio, and other semantic-related parameters. Also, trending videos could be analyzed separately based on their category information for view count prediction.

References

[1] (2024) Statista, Statista Most Popular Social Networks. [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/

[2] (2024) Oberlo, Oberlo YouTube Statistics. [Online]. Available: https://www.oberlo.com/blog/youtube-statistics

[3] A. Brodersen, S. Scellato, and M. Wattenhofer, "YouTube around the world: Geographic popularity of videos," WWW'12 - Proceedings of the 21st Annual Conference on World Wide Web, pp. 241–250, 2012.

[4] F. Figueiredo, J. M. Almeida, M. A. Gonçalves, and F. Benevenuto, "TrendLearner: Early prediction of popularity trends of user generated content," Inf Sci (N Y), vol. 349–350, pp. 172–187, 2016

[5] S. I. A. P. Diddeniya, H. N. Gunasinghe, and C. Premachandra, "YouTube Trending Video Analysis in Sri Lanka," in 2022 2nd International Conference on Image Processing and Robotics, ICIPRob 2022.

[6] J. F. Andry, S. A. Reynaldo, K. Christianto, F. S. Lee, J. Loisa, and A. B. Manduro, "Algorithm of Trending Videos on YouTube Analysis using Classification, Association and Clustering," in Proceedings of 2021 International Conference on Data and Software Engineering: Data and Software Engineering for Supporting Sustainable Development Goals, ICoDSE 2021

[7] P. Manikandan, A. Manimuthu, J. Sharmila Rajam, and K. Sathya Narayana Sharma, "Prediction of YouTube View Count using Supervised and Ensemble Machine Learning Techniques," in International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, ICACRS 2022 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1038–1042, 2022.

[8] Z. Halim, S. Hussain, and R. Hashim Ali, "Identifying content unaware features influencing popularity of videos on YouTube: A study based on seven regions," Expert Systems and Applications, 206, 2022.

[9] Y. Dokuz, Discovering popular and persistent tags from YouTube trending video big dataset, Multimedia Tools and Applications, 83, 10779–10797, 2024.

[10] Y. Dokuz, "Cross-country persistent tags discovery from YouTube trending video big dataset," Nigde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 12 (4), 1538-1544, 2023.

[11] R. Sharma, YouTube Trending Video Dataset. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/rsrishav/youtube-trending-video-dataset

[12] Montgomery, Douglas C., Elizabeth A. Peck, and G. Geoffrey Vining. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons, 2021.

[13] Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

[14] Graupe, D. (2013). Principles of artificial neural networks, World Scientific.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Yüksek Basınçlı Alüminyum Dökümünde Vakum Uygulamasının Parça Üzerindeki Optimizasyonu

Barış Çavunt[a], Deniz Güler[b]

[a]Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
[b] Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş, Manisa, Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** baris.cavunt@doktas.com

ÖZET

Vakum prosesi Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm'de (YBAD) gaz boşluklarını önlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, vakum makinesinin YBAD tezgahlarıyla birlikte çalışarak vakumun etkili olduğu süreler boyunca kalıp üzerinde yer alan valflerin açılıp kapanması ile gerçekleşir. Bu sayede basınç düşürülerek dolum esnasında ergiyik alüminyum içerisinde yer alan gaz miktarı düşürülmektedir. Vakum uygulamasının parça üzerindeki optimizasyonu, döküm sürecinin her aşamasının incelenmesini ve uygun parametrelerin belirlenmesini gerektirir. Bu nedenle, gözenekliliği azaltmak ve parçaların optimizasyonunu sağlamak için vakum metodu YBAD prosesinin yöntemlerinden bir tanesidir. Bu çalışmada, vakum uygulamasının YBAD'de parçaların, porozite seviyesinin düşürülerek kusur oranını azalttığı ve mekanik özelliklerin de iyileştiği gösterilmiştir. Çalışma kapsamında Magmasoft yazılımı kullanılarak parçanın vakumlu ve vakumsuz simülasyonları yapılıp vakum etkinliği incelenmiştir. Bu sayede hem bilgisayar destekli ortamında hem de deneysel koşullarda çalışılmıştır. Sonuç olarak, parça üzerindeki iyileştirmeleri saptamak adına X-Ray, mikroyapı ve çekme testleri sonuçları incelenmiştir. Bu çalışma, YBAD'de vakum uygulamasının parça kalitesi ve üretim verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Vakumlu ve vakumsuz inceleme sonucunda, YABD'de vakum kullanılan parçalarda test sonuçlarının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroyapı, Porozite, Vakum Parametreleri, Vakum Uygulaması, Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm.

Optimization of Vacuum Application on the Part in High Pressure Aluminum Casting

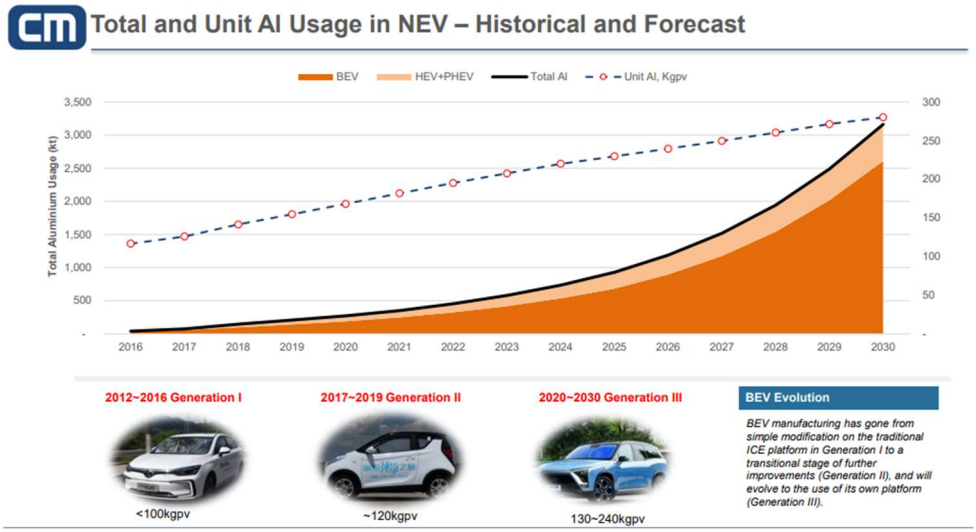
ABSTRACT

The vacuum process is a method used to prevent porosity in High-Pressure Aluminum Casting (HPDC) applications. This method is implemented by a vacuum machine working with HPDC machines and opening and closing valves when the vacuum is working. Thus, the pressure is reduced and the amount of gases in the molten aluminum is reduced during the filling process. Optimization of vacuum application requires examination of each stage in the casting process and determination of appropriate parameters. Therefore, the vacuum method is to reduce porosity and optimize the quality of the parts. In this study, it was shown that vacuum application reduces the defect and improves the mechanical properties by reducing the porosity level. Vacuum and non-vacuum simulations of the part were made using Magmasoft software, and vacuum efficiency was examined. Thus, it was studied both in a computer-aided program and experimental conditions. In conclusion, X-Ray, microstructure, and tensile test results were examined to determine improvements. This study aims to evaluate the effect of vacuum application quality and production efficiency in HPDC. As a result of the vacuum and non-vacuum parts examination, it was observed that the test results were better in the parts where the vacuum was used in HPDC.

Keywords: High-Pressure Die Casting, Microstructure, Porosity, Vacuum Application, Vacuum Parameters.

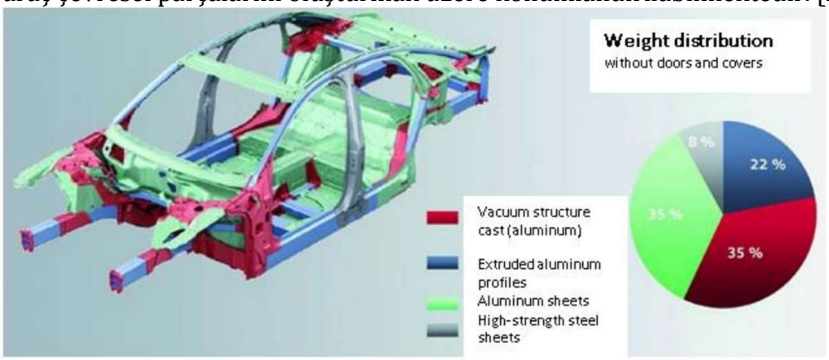
I. GİRİŞ

Alüminyum, günümüzde otomotiv endüstrisinden uçak üretimine, elektronikten ambalaj sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe, alüminyumun hafifliği, dayanıklılığı ve geri dönüştürülebilirliği gibi avantajları, Şekil 1.'de de görüldüğü üzere üreticilerin tercihini bu yöne çekmektedir [1]. Bu artan talep, alüminyum alaşımlarının kullanıldığı döküm sektöründe de belirgin bir etki yaratmıştır. Özellikle yüksek basınçlı alüminyum dökümü, ince kesitli ve yüksek kaliteli parçaların üretiminde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. Araç üzerindeki alüminyum kullanımının yıllara göre dağılımı [1]

Yüksek basınçlı alüminyum dökümünde kaliteyi artırmak ve istenilen özelliklere sahip parçalar üretebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında önemli bir yere sahip olan vakum yöntemi, döküm sektöründe sıklıkla tercih edilen ve parça kalitesini belirgin şekilde iyileştiren bir tekniktir. Vakum yöntemiyle dökülen parçaların mukavemet özellikleri, iç yapıları ve döküm hataları, vakumsuz döküm yöntemine göre daha üst seviyelerde kontrol altına alınabilmektedir. Şekil 2.'de de görüldüğü üzere, vakumlu parçalar araç çevresel parçalarını oluşturmak üzere konumlandırılabilmektedir. [2].



Şekil 2. Audi Space Frame Konspet Aracının Malzeme Seçimi – Audi A8 [2]

Ancak, yüksek basınçlı dökümde kullanılan parametreler parçanın tasarımına, et kalınlığına ve projeksiyon alanına göre değişiklik gösterebileceği gibi döküm anında kontrol edilmesi mümkün olmayan parametrelerden birisi de hava sıkışmasıdır. Bekleme potalarındaki alüminyumunun, kovan haznesine doldurulması ve pistonun yüksek basınçlar altında harekete başlaması ile birlikte ergimiş alüminyum kalıp içerisindeki boşlukta ilerler. Bununla birlikte kalıp boşluğunda bulunan hava, parçanın şekline göre ergimiş alüminyum tarafından itilerek belirli bölgelerde sıkışabilir. Bu sıkışan hava, hava cepleri gibi kalıp üzerinde açılabilecek küçük boşluklar yardımıyla belirli alanlarda lokalize edilebilir. Fakat parça tasarımına bağlı olarak, kalıp üzerinde açılması mümkün olmayan bu hava cepleri, parça içerisinde gaz porozitesi ismiyle tanımlanan bir döküm hatasıyla karşı karşıya kalınmasına sebep olur.[3]

İşte bu noktada vakum yöntemi devreye girer. Vakum yöntemiyle, kalıp içindeki hava piston hareket etmeye başladığında vakumlanmaya başlar. Ergimiş alüminyum ondüla ismi verilen hava kanallarına doğru hareket etmeye başladığında vakumlama işlemi sona eder. Bu sayede, kalıp içindeki hava sıkışması riski en aza indirilir ve parça içinde gaz porozitesi oluşma ihtimali önlenmiş olur.

Yüksek basınçlı alüminyum dökümünde vakum yönteminin kullanımı, parça kalitesini artırırken döküm hatalarını minimize etmektedir.[4] Bu yöntem, döküm sektöründe teknolojinin sunduğu imkanlardan yararlanarak daha sağlam, daha hassas ve daha kaliteli alüminyum parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, döküm endüstrisindeki ilerlemelerle birlikte vakum yöntemi, alüminyumun gittikçe yaygınlaşan kullanımıyla önemli bir yer edinmektedir.

II. MATERYAL METOT

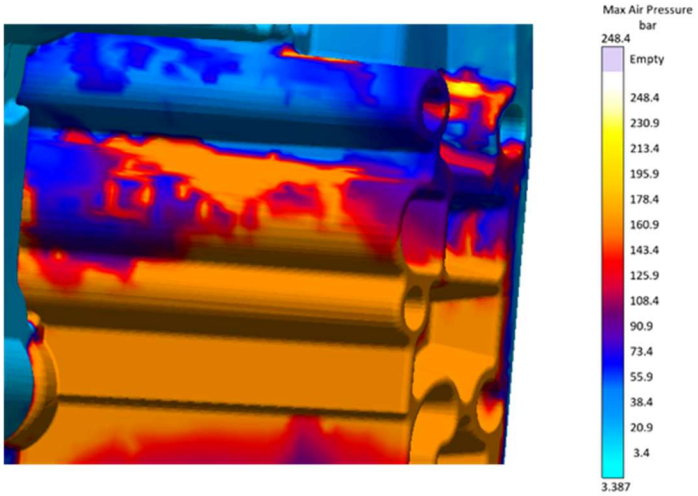
Yüksek basınç döküm yöntemi ile üretilen şanzıman parçalarının tasarımsal kompleksitesi sebebiyle gaz porozitesinin tamamen sıfıra indirilebilmesi mümkün değildir. Kullanılan şanzıman parçasının toplam baskı ağırlığı 15,4 kg olup, toplam projeksiyon alanı 2.609 cm^2'dir. Yüksek basınçlı alüminyum üretiminde yaygınlıkla kullanılan AlSi9Cu3 malzemesi kullanılmıştır. Projedeki temel hedef, şanzıman parçasının araç üzerindeki isterlerini başarıyla yerine getirebilmesidir. Özellikle, çok kanallı bir yapıya sahip olan bu parça, otomatik vites değişimi görevini üstlenmektedir. Bu kanallar arasındaki yağ geçişleri, vitesin basamaklarını belirlemektedir.[5] Bu yüzden bu kanalların arasında oluşabilecek en küçük sızıntı bile parçanın görevini yerine getirememesine sebep olur. Bu sızıntıların en önemli nedenlerinden biri de döküm sırasında oluşan gaz porozitesidir. Bu yüzden X-Ray'de belirlenen porozite seviyesi, parçanın fonksiyonunu yerine getirebilecek bir seviyede olmalıdır. Bu seviye, ASTM E 505 standartına göre porozite seviyesi Level 2 olarak tanımlanmıştır. Bunun sebebi belirlenmiş sızdırmazlık seviyesinin sağlanabilmesidir. Ancak, parçanın tasarımı sebebiyle hava cepleri tarafından elimine edilemeyen gaz poroziteleri, bu standartları karşılamamaktadır.

A. Vakum Uygulamasının Döküme Etkisi

Vakum uygulaması, döküm sırasında kontrol edilemeyen parametreleri kontrol altına almak için oldukça etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu projede 50m/s gibi yüksek hızlarda kalıp içerisine giriş yapan alüminyumun sürüklediği toplam hava miktarı 5774cm3'tür. Özellikle, kalıp içerisine yüksek hızlarda giren alüminyumun sürüklediği hava miktarının kontrol altına alınması için vakum gibi özel uygulamalara ihtiyaç vardır. Döküm sırasında otomatik olarak tetiklenen vakum ünitesi, pistonun kovan dolum ağzını geçmesiyle (T1 Fazı) başlar ve dolum esnasında ikinci fazın başlangıcına kadar çalışmaya devam eder. Bu sayede döküm işleminin gerçekleştirileceği kalıp boşluğunda 50mbar'ın altında bir basınç oluşturur.[6] Bu da ergimiş alüminyumun 1000bar basınç altında kalıp içerisinde ilerleyişini kolaylaştırır. Düşük basınçlı ortamda ilerleyen ergiyik alüminyum havanın etkisinin ortadan kaldırılmasıyla daha türbülanssız bir akış sağlar. Bu türbülanssız akış da parça yüzeyinde oluşabilecek döküm hatalarını ortadan kaldırır ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesine olanak sağlar.

B. Simülasyon ve Deneme

Öte yandan, parçanın uç noktalarında ve kalıp tasarımının hava cebi oluşturmasında elverişli olan bölgelerde hava sıkışması kontrol altına alınabilir durumdadır. Aşağıdaki Şekil 3'de de görülebileceği üzere, hava sıkışması büyük çoğunlukla parçanın uç noktasında toplanmış ve yüksek bir hava basıncı oluşturduğu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3. Vakumsuz ve hava cepsiz parçanın maksimum hava sıkışma sonucu

Bu tarz yüksek basınçlarla karşılaşan alüminyum, bu basıncı yenebilmek adına daha çok basınca ihtiyaç duyar ve bu da gerekli piston kuvvetinin olduğundan daha fazla kullanılmasını gerektirir. Bu da hem tezgah üzerindeki mekanik hareket eden tüm parçaların daha çabuk eskimesine hem de kalıp içi aşınmaların daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Şekil 4'de yer alan kalıbın, yüksek iç basınç sebebiyle aşınmış olduğunu gözlemleyebilmekteyiz.



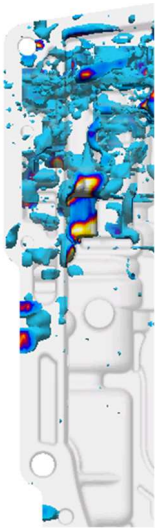
Şekil 4. Yüksek iç basınç nedeniyle aşınan kalıp görselleri

Kalıp içi basıncın yüksek olması dolayısıyla oluşan bu tarz yüzey hataları, ilerleyen aşamalarda kalıptaki figürlerin kopmasına, kalıpta çatlak oluşumuna ve üretilen parçaların kullanılamamasına sebep olur. Yüksek iç basınçla birlikte kalıp içi basınç, tezgah kapama kuvvetinden fazla bir basınç uygulayarak kapanan kalıbın açılmasına yol açar. Böylelikle çapaklı parça oluşumu veya farklı döküm sorunlarına yol açar. Vakum yöntemiyle birlikte hem kalıp içi basınç azaltılabilir, hem de havanın kontrol edilemeyen bölgelerdeki davranışı kontrol altına alınabilir.

Projede bulunan şanzıman parçasının döküm simülasyonu Magmasoft simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonrasında, simülasyon çıktılarından olan Hava ve Hava sıkışması sonuçları irdelenmiştir. İncelenen bu çıktılar doğrultusunda kalıp içerisinde hava ceplerinin konumları belirlenmiştir. Şekil 5a ve 5b'de görülebileceği üzere, parçanın uç noktalarında sıkışan havanın, hava cebi içerisine hapsedilebileceği gözlemlenmiştir.

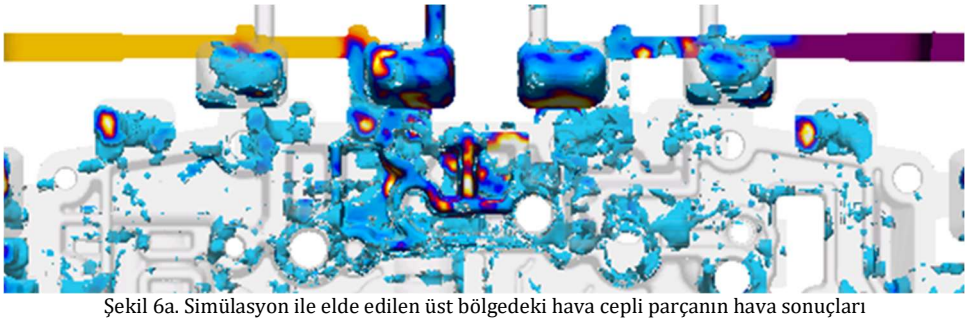


Şekil 5a. Simülasyon ile elde edilen üst bölgedeki hava sonuçları

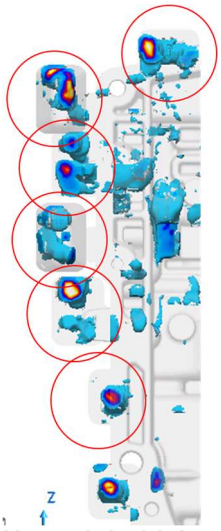


Şekil 5b. Simülasyon ile elde edilen yan bölgedeki hava sonuçları

Simülasyon ile yapılan denemeler sonucunda alınan veriler incelenerek hava cebi bölgeleri kalıp tasarımına uygun olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sıkışan havanın, hava ceplerine itildiği Şekil 7a ve 7b'de de gözlemlenebilmektedir.

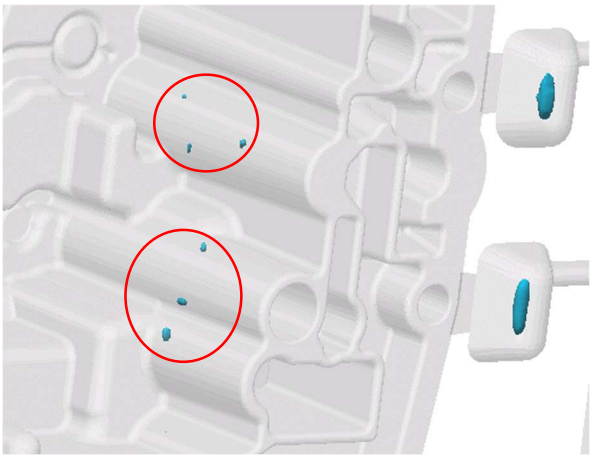


Şekil 6a. Simülasyon ile elde edilen üst bölgedeki hava cepli parçanın hava sonuçları

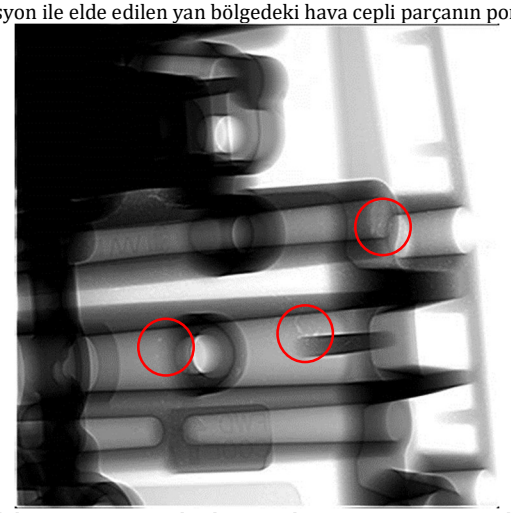


Şekil 6b. Simülasyon ile elde edilen yan bölgedeki hava cepli parçanın hava sonuçları

Yerleştirilen hava cepleri, parçanın yan bölgelerinde bulunan hava sıkışmasını elimine edebilmiş fakat orta bölgelerde bulunan hava sıkışmasının tamamını elimine edememiştir. X-Ray görselleri MU 2000 cihazından alınmış, TS EN ISO 5579 standartına göre kontrol edilmiştir. İstenen porozite seviyeleri ASTM E505 referansına göre incelenmiştir. Porozite sonuçları Şekil 7. ve X-Ray sonuçları Şekil 8. karşılaştırıldığında, hava sıkışmasının ortadan kaldırılamadığı bölgelerdeki sonuçlar, parçanın isterlerini yerine getirememektedir.



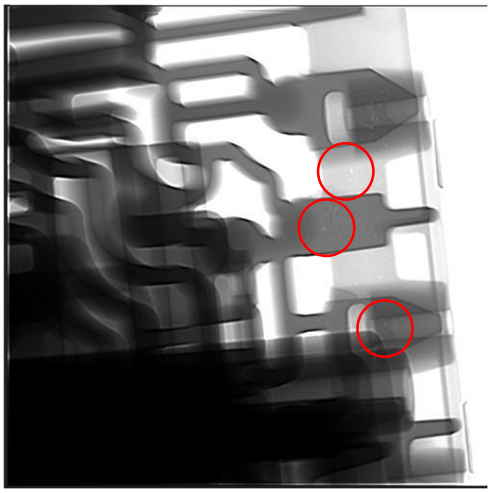
Şekil 7. Simülasyon ile elde edilen yan bölgedeki hava cepli parçanın porozite sonuçları



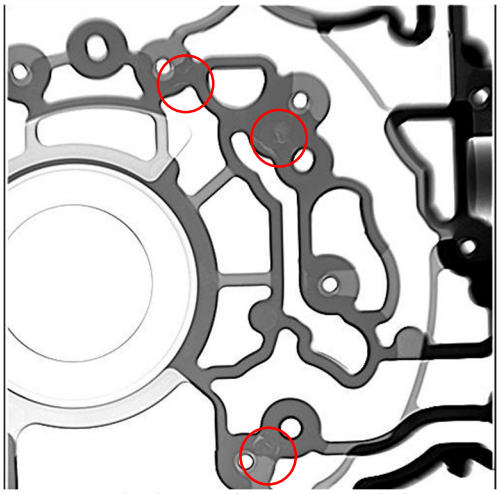
Şekil 8. Denemesi yapılan hava cepli parçanın X-Ray sonuçları

III. SONUÇLAR

Sonuç olarak vakumsuz yapılan simülasyon çıktıları, parçanın istenen özelliklerini yerine getiremeyeceğini kanıtlamaktadır. Parça üzerinde vakumsuz, hava cebi eklenmeden yapılan simülasyon çıktıları ve döküm denemesinin sonuçları irdelendiğinde gaz porozitesinin beklenilen seviyenin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Kalıp tasarımının uygun olduğu bölgelere hava cebi eklentisi yapılarak yapılan simülasyon çıktıları ve döküm denemeleri incelendiğinde, porozite seviyesi Şekil 9a ve 9b'de görüldüğü üzere beklenilen seviyenin çok üzerinde kalmıştır.



Şekil 9a. Denemesi yapılan hava cepli parçanın yağ kanalları X-Ray sonuçları



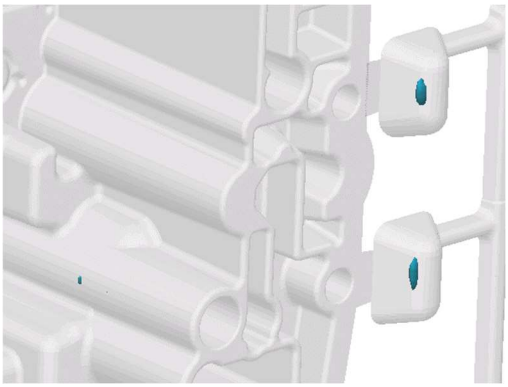
Şekil 9b. Denemesi yapılan hava cepli parçanın orta bölgesi X-Ray sonuçları

Bu neticede kalıp üzerinde hava kanalları açılarak bunlar hava cepleri ile birbirine bağlantılı bir tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarım neticesinde yapılan simülasyon denemeleri hava sıkışması sonuçlarının iyileştirilebileceği yönünde çıktı sağlamaktadır. Şekil 10'da görülebileceği gibi, parça içerisinde hapsolan hava, parça tasarımı kaynaklı türbülanslı hareketin yaratmış olduğu havadır. Sürüklenen havanın, vakum tarafından emildiği ve hava kalıntısı kalmadığı gözlemlenmektedir.



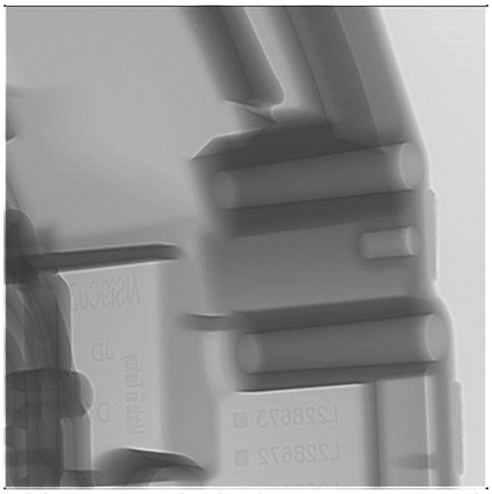
Şekil 10. Simülasyonda denemesi yapılan hava cepli vakumlu parçanın hava sonuçları

Şekil 11'de simülasyon çıktılarından birisi olan porozite sonuçları incelenmiş ve porozite riskinin minimize edildiği gözlemlenmişitir.



Şekil 11. Simülasyonda denemesi yapılan hava cepli vakumlu parçanın porozite sonuçları

Simülasyon çıktılarına dayanarak kalıba vakum bağlantısı yapılmış ve vakum parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen vakum parametrelerine göre döküm denemesi yapılmış ve parçanın X-Ray görüntüleri incelenmiştir. Şekil 12a ve 12b'de görülebileceği üzere, vakumlu denemesi yapılan dökülmüş parçanın X-Ray sonuçlarının iyileştiği ve hava sıkışması sonucunda oluşan porozite sonuçlarının ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.

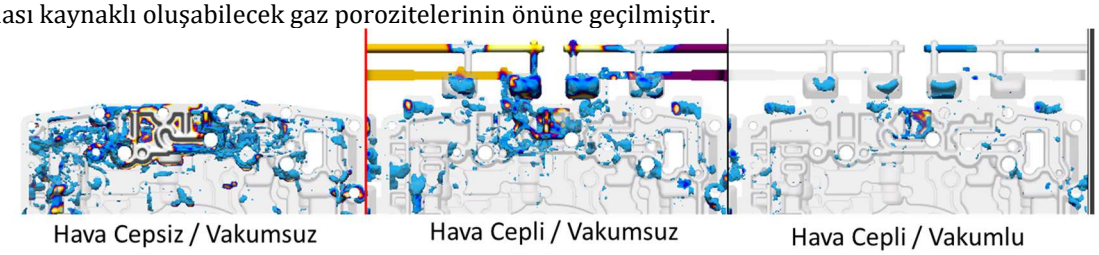


Şekil 12a. Hava cepli vakumlu parçanın X-Ray görseli



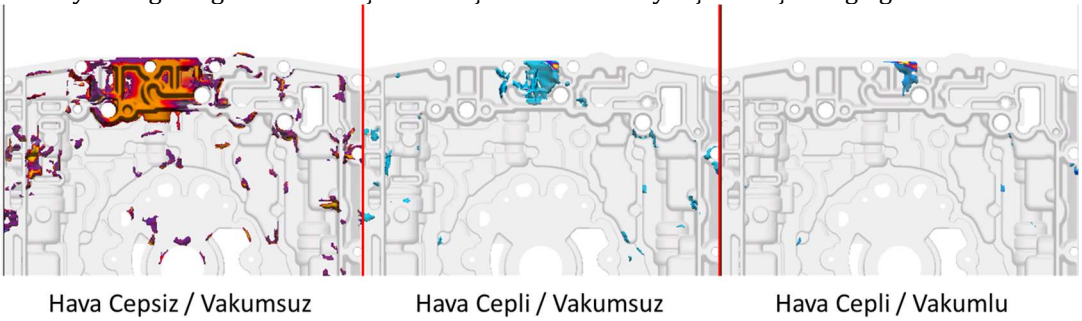
12b. Hava cepli vakumlu parçanın X-ray görseli

Şekil 13'de görülebileceği üzere, vakumsuz hava cepsiz yapılan simülasyon çıktıları, vakumsuz hava cepli yapılan simülasyon çıktıları ve vakumlu hava cepli yapılan simülasyon çıktıları incelendiğinde hava kapması kaynaklı oluşabilecek gaz porozitelerinin önüne geçilmiştir.



13. Simülasyondaki hava sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 14'da bulunan hava sıkışması sonuçları incelendiğinde de havanın itilerek uç bölgelerde ve türbülans yarattığı bölgelerdeki sıkışma sonuçları vakum ile iyileştirilmiş olduğu gözlemlenmektedir



14. Simülasyondaki hava sıkışması sonuçlarının karşılaştırması

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, Yüksek Basınçlı Alüminyum Döküm (YBAD) işlemlerinde vakum uygulamasının parça kalitesi ve üretim verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Vakumun döküm sürecinde gaz porozitesini azaltarak parça kalitesini artırdığı ve döküm hatalarını minimize ettiği gözlemlenmiştir. Vakum ergimiş alüminyumun türbülanssız bir şekilde akmasını sağladığı belirlenmiştir. Çalışmanın başlangıcında, alüminyumun otomotiv endüstrisindeki geniş kullanım alanları vurgulanmıştır. Bu projedeki şanzıman parçasının karmaşık yapısı ve hassas işlevi, döküm sürecinde gaz porozitesi gibi hataların önlenmesini zorunlu kılmaktadır. Çalışmanın sonuçları, vakum uygulamasının parça üstündeki gaz porozitesini belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. Özellikle, simülasyon ve deneysel çalışmalar, vakumun parçanın iç noktalarında sıkışan havayı ortadan kaldırdığını doğrulamıştır. Döküm sırasında vakumun etkili kullanımı, parça tasarımı ile uyumlu olmalıdır. Bu nedenle, çalışmada vakumun etkinliğini artırmak için parça tasarımında hava cepleri oluşturulmuş ve bu ceplerin vakum altında etkili bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Gelecekteki çalışmalar, vakum uygulamasının Yüksek Basınçlı Alüminyum Dökümünde daha geniş bir kullanım alanı bulması ve döküm sürecindeki diğer faktörlerle etkileşimini daha detaylı bir şekilde incelemelidir. Ayrıca, farklı alüminyum alaşımları ve parça tasarımları üzerinde yapılan vakum uygulaması çalışmaları, endüstriye daha uygun ve optimize edilmiş döküm yöntemlerinin geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

V. ÇIKARIM

Sonuç olarak, kompleks yapıda bulunan şanzıman parçası gibi parçaların parça için giriş alanları tanımlandıktan sonra simülasyon sonuçları irdelenerek vakum gerekliliği yapılan tasarım çalışmalarında belirlenebilir. Vakum uygulaması ile birlikte oluşacak gaz porozitesi, kalıp içi aşınmaların önüne geçilerek daha verimli bir döküm şartı sağlanmaktadır. Özellikle, simülasyon sonuçları parçanın belirli bölgelerinde oluşabilecek gaz porozitesinin minimize edildiğini ve parça kalitesinin artırıldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, vakum uygulamasının döküm sürecindeki diğer parametrelerle etkileşimi de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, dolum hızı, vakum basıncı ve vakum süresi gibi faktörlerin parça kalitesine etkisi incelenmelidir. Bu parametrelerin dengelenmesi, daha sağlam ve homojen parçaların üretilmesine katkı sağlayabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada deneyleri yapmama olanak sağlayan Döktaş Dökümcülük A.Ş.'ye ve engin bilgilerini paylaşan tüm ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim. Son olarak, bu makaleyi okuyan ve değerli geri bildirimleriyle katkıda bulunan tüm okuyuculara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Assessment of Aluminium Usage in China's Automobile Industry 2016~2030 [Online]. Available: https://international-aluminium.org/resource/assessment-of-aluminium-usage-in-chinas-automobile-industry-2016-2030-exec-summary/

[2] C.-P. Koeth, "Audi und die Geisteshaltung Leichtbau," 2012. [Online]. Available: https://www.automobil-industrie.vogel.de/audi-und-die-geisteshaltung-leichtbau-a-376068/

[3] R.C. Kim, K.R. Hong, J.Y. Yang, W.C. Yang "High pressure die casting process optimization for improving shrinkage porosity and air entrainment in carburetor housing with aluminum alloy using Taguchi-based ProCAST simulation and MADMbased overall quality index" 2-3, 2024.

[4] X.P. Niue, B.H. Hu, I. Pinwill, H. Li, "Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys" 119-127, 2000.

[5] Xu, N., Chen, H., Hu, Y. and Liu, H. (2007) 'The integrated control system in automatic transmission',2007 International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, August, Harbin, China, pp.1655–1659.

[6] Xu, N., Chen, H., Hu, Y. and Liu, H. (2007) 'Effect of super vacuum assisted high pressure die casting on the repeatability of mechanical properties of Al-Si-Mg-Mn die-cast alloys", Journal of Material Processing Technology, pp.25–28., 2018.

www.iners.duzce.edu.tr

5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mart 2024, Düzce/Türkiye

5th International Engineering Research Symposium
07-09 March 2024, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-05-4

Elektroforming ile gümüş katkılı saf demirden biobozunur stent malzemesi üretimi

Candan Şen Elkoca[a], Semih Engün[b]*

[a]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Alaplı Zonguldak/Türkiye.
[b]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Zonguldak/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** candan.selkoca@beun.edu.tr

ÖZET

Kardiovasküler uygulamalar için biyolojik olarak bozunabilen (biyobozunur) stent malzemeleri üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada bu tür bir malzeme için elektroforming ile gümüş katkılı demir malzemenin üretim olanakları ve özellikleri araştırılmıştır. Katodik etkisinden yararlanmak için gümüş nanopartikülleri elektroforming işlemi sırasında saf demir bünyesine alınmıştır. Mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon incelemelerini kolaylaştırmak için elektroforming işlemi sırasında parlatılmış titanyum plakalar üzerinde Ag katkılı ya da katkısız saf demir folyolar üretilmiştir. Üretilen folyolar, üzerindeki gerilimleri ortadan kaldırmak için 550°C'de ve homojen ve ince taneli bir yapı elde etmek için 920°C'de tavlanmıştır. Üretilen malzemelerin mikroyapısal karakterizasyonu, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleriyle, mekanik özellikleri mikrosertlik ölçümleriyle ve bozunma hızları %3,5'luk tuz çözeltisindeki elektrokimyasal korozyon testleriyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre, Ag katkılı saf demir biyobozunur stent malzemesi olarak bir potansiyel teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyobozunur stent, elektroforming, demir kaplama, gümüş, stent.

Production of biodegradable stent material from silver-doped pure iron by electroforming

ABSTRACT

Intensive studies are being carried out on biodegradable stent materials for cardiovascular applications. In this study, the production possibilities and properties of silver-doped iron material by electroforming for this type of material were investigated. To benefit from its cathodic effect, silver nanoparticles were incorporated into pure iron during the electroforming process. To facilitate microstructure, mechanical properties and corrosion investigations, pure iron foils with or without Ag doping were produced on polished titanium plates during the electroforming process. The produced foils were annealed at 550°C to eliminate the stresses on them and at 920°C to obtain a homogeneous and fine-grained structure. Microstructural characterization of the produced materials was carried out by optical microscope and scanning electron microscope (SEM) examinations, mechanical properties by microhardness measurements, and degradation rates by electrochemical corrosion tests in 3.5% salt solution. According to the data obtained, Ag-doped pure iron poses a potential as a biodegradable stent material.

Keywords: Biodegradable stent, electroforming, iron plating, silver, stent.

I. GİRİŞ

Kardiyovasküler stentleme, küçük, genişleyebilir tel örgüden bir kafesin (stent) intravasküler olarak hastalıklı bir artere yerleştirilip, onu açık tutan kateter bazlı bir prosedürdür. Mevcut stent teknolojisi, 316L paslanmaz çelik ve nitinol gibi korozyona dayanıklı malzemelerden yapılmış kalıcı implantların kullanımına dayanmaktadır. Kalıcı implantların, geri dönüşü olmayan bir şekilde, kalp damar duvarında ömür boyu kalması amaçlanmıştır. Ancak, stentlerin arter tıkanıklığı ve arteryel yeniden şekillenmeyi

önleyen iskele etkisinin yalnızca belirli bir zaman dilimi (6-12 ay) için gerekli olduğu ve bu durumda stentlerin kalıcı olarak bulunmasının daha fazla yarar sağlamayacağı gösterilmiştir [1]. Bu nedenle, iskele etkisi sağlayan ve sonrasında bozunan biyolojik olarak çözünebilen stentlerin geliştirilmesi, kalıcı stentlerle gözlenen olası komplikasyonları önlemeye yönelik mantıklı bir yaklaşım olarak görülmektedir [1,2]. Biyolojik olarak bozunan stent malzemesi olarak polimerlerin stent olarak uygulamalarını sınırlayan düşük radyal mukavemet ve enflamatuar tepki gibi dezavantajları vardır [3]. Magnezyum (Mg) alaşımları, demir - mangan alaşımı (Fe-35Mn) ve saf demir, biyolojik olarak bozunabilen stent uygulamaları için araştırılan metalik malzemelerdir [4–8]. İmplantasyon sonuçları, aşırı hızlı bozunma oranını düşürmek ve mekanik özelliklerini artırmak için Mg alaşımlarının daha fazla iyileştirmenin gerekli olduğunu göstermiştir [3-5]. Toz metalurjisi ile geliştirilen Fe-35Mn alaşımı, Mg alaşımlarına göre daha iyi mekanik özellikler sergilerken, çok yavaş bir bozunma sergilemiştir [6]. Tavşan ve domuz deneklere döküm ve termomekanik işlem ile üretilen saf demir implante edilmiş ve sonuçta, demirin iyi bir biyouyumluluğa ve Mg alaşımlarına kıyasla daha üstün mekanik ve bozunma özelliklerine sahip olduğunu görülmüştür. Ancak, saf demirin de in vivo (vücut içinde) bozunması, in vitro (laboratuvarda) bozunma testlerinde elde edilen değerlerden daha yavaştır.

Fe, insan vücudundaki hayati eser elementlerden birisidir ve oksijen taşınması, DNA sentezi ve elektron transferi gibi önemli metabolik süreçlerde yer alır. Demir iyi mekanik özelliklere ve biyouyumluluğa sahip bir elementtir. Ek olarak in vitro ve in vivo çalışmalarda lokal veya sistemik toksisite görülmemiştir. Ancak demirin bozunması genellikle doku onarımından sonra ve bu aşamadan sonra bile neredeyse bozunmadan kalması onun biyobozunur stent malzemesi olarak kullanımını sınırlamaktadır. Demir esaslı biyobozunur stentler Mg ve Zn esaslı adaylara göre iyi bir biyouyumluluk, yüksek mukavemet ve elastisite modülü, iyi bir süneklik ve deformasyon sertleşmesi oranı gibi çekici mekanik özellikler sergilemektedir. Bu mekanik özellikler ince destek tasarımı, düşük büzülme ve genişlemede düşük kırılma riski gibi avantajlar sunmaktadır. Demir esaslı stentlerin dezavantajı ise çok yavaş bozunma hızına sahip olması ve bu yüzden implantasyondan 53 ay sonra bile neredeyse bozulmadan kalmasıdır [9].

Fe stentlerin bozunma hızını arttırmak için hem metalurjik hem de yüzey stratejileri bağlamında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Metalurjik yaklaşımlardan birisi Fe matrisine karşı katodik alanlar gibi davranan ve bu şekilde mikro galvanik korozyon oluşturan daha soy elementler eklemektir [10]. Yüzeyde çok sayıda galvanik hücre oluşturan Pt ve Au mikrodizileri [11,12] gibi soy metallerle yüzeyin kaplanması ve Polilaktit hidrolizi ile indüklenen lokal pH'ın azalmasına ve pasivasyon tabakası birikiminin hafifletilmesine olanak sağlayan organik polilaktit katmanların oluşturulması [13] da diğer yaklaşımlar arasında sayılabilir.

Yeni stent malzemelerinin geliştirilmesinde biyogüvenlik ana husus olduğundan, Fe esaslı biyobozunur stentlerin biyouyumluluğu sistematik olarak in vitro ve in vivo olarak değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki, fare fibroblastları veya düz kas hücre çizgileri gibi hayvan hücreleri ve özellikle endotel hücreleri gibi insan hücreleri dahil olmak üzere farklı hücre çizgilerini kullanan doğrudan ve dolaylı temas testlerini içerir [14]. In vitro değerlendirmenin ardından gerçekleştirilen in vivo testler, tavşanlar ve evcil domuzlar gibi hayvan modellerini temel alır ve kısa veya uzun vadeli çalışmalara (birkaç günden 4 yıla kadar) dayanır [15].

Fe bazlı malzemelerin korozyon oranının arttırılması için şimdiye kadar demire Ga, N, W, Au, Ag, Co, Pd ve Mn gibi çeşitli alaşım elementleri ilave edilmiştir [16–23]. Alaşımlama, Fe matrisin standart elektrod potansiyelini ve mikro yapısını değiştirerek malzemenin korozyon direncinde değişime yol açmaktadır. Mn, Au, Ag, Pd, C, W ve Co gibi elementlerle alaşımlamanın demirin bozunma oranını arttırdığı görülmüş, ancak yine de istenilen değerlere ulaşılamamıştır.

Elektroforming (elektrodepozisyon, elektrobiriktirme), bir cismin kalıbı üzerine metalin elektrokaplama yoluyla kopyasının yapılması, ardından kalıptan ayrılmasıdır. Bu işlemle, karmaşık yüzey ayrıntıları tam olarak yeniden üretilir. Elektroforming yöntemi ile üretilen demirin mevcut en yaygın uygulaması mikroelektronik cihazlarda ve elektromanyetik kayıt ünitelerinde kullanılan folyoların üretimidir [24,25]. Elektroforming ile üretilen demir, kardiyovasküler stent uygulamaları için de önemli bir potansiyel malzeme olarak ortaya çıkmıştır [26]. Bu malzemenin mekanik özellikleri bugün stent üretiminde kullanılan paslanmaz çelik ile karşılaştırılabilirken, bozunma oranında istenilen değerlere ulaşılamadığı için bu konuda hala bir gelişme beklenmektedir [27].

Elektroforming ile üretilen malzemelerde dengesiz kristalleşme, safsızlıkların birikmesi ve biriktirme işleminde üretilen mikroskobik kusurlardan kaynaklı iç gerilim ve zayıf süneklik iyileştirilmesi gereken konulardır [28]. Bu zayıflıkları ortadan kaldırmak için gerilim giderme tavlaması ya da normalizasyon tavı yapılabilir. Normalizasyon ayrıca tane boyutunu küçülterek mukavemet artışı yanında artan tane sınırı içeriği ile mikrokorozyona katkı sağlayacaktır [29].

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada Moravej ve arkadaşlarının [28] kullandığı elektroforming işleminden yararlanılmıştır. İşlem için kullanılan elektrolit $FeCl_2$ (400 g/lt) ve $CaCl_2$ (80 g/lt) tuzlarının deiyonize su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır. Sodyum sakarin (1 g/lt) ve sodyum dodesil sülfat (0,25 g/lt) stres azaltıcı ve çukurlaşmayı önleyici maddeler olarak elektrolite eklenmiş ve çözelti HCl kullanılarak pH değeri 1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Elektroforming sonrasında oluşan saf Fe folyonun kolayca ayrılabilmesi için katod altlık olarak 0,1x5x10 cm ebatlarındaki saf titanium (Ti) plaka kullanılmıştır. Aynı ebatlardaki son derece düşük bir karbon içeriğine sahip arayer ataomsuz (Interstitial Free-IF) çelik plakalar ise demir anot olarak kullanılmıştır. Çiziksiz ve parlak bir yüzey elde etmek için saf Ti palaka HCl ve HF karışımından (3:1 oranında) oluşan bir solüsyona daldırılmıştır. Son derece şiddetli bir reaksiyon veren bu işlem sırasında çözelti buzlu su ile soğutulmuştur.

90°C'deki sabit sıcaklıkta yapılacak elektroforming işlemi için Pt100 tipi bir termokuple ile hassas bir ısıtma ve karıştırma yapabilen manyetik karıştırıcılı ısıtıcı kullanılmıştır. Hem çözelti içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı yaratmak hem de Ag nano partiküllerinin homojen bir şekilde solüsyon içerisinde dağıtılabilmesi için solüsyon PVC kaplı bir balık ile 1000 devir/dak. hızında karıştırılmıştır. Elektroforming işleminde doğru akım sağlayan bir güç kaynağı kullanılmış ve anot ve katod arasındaki mesafe 4 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Elektroforming işlemlerinde en iyi akım yoğunluğu olarak ifade edilen 2 A/dm^2 kullanılmış ve 8 saat süren bir kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan elektroforming düzeği.

Ag katkılı saf demir folyoların üretimi bir öncekiyle aynı deney koşullarında, ancak bu kez 10nm boyutlarında, 40 ppm/lt Ag nanopartikülleri içeren çözelti içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Elektrofroming yöntemiyle elde edilen Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyolardaki kaplama gerilimlerinin giderilmesi için 550°C'de 1 saat gerilim giderme tavlaması ve homojen ve ince taneli bir yapı elde etmek

için 920°C'de 15 dakika normalizasyon işlemi yapılmıştır. Bu işlemlerde oksidasyondan kaçınmak için demir folyolar sıvı kurşun (Pb) banyosuna daldırılmıştır. Sanayide çelik tellerin patentlenmesinde kullanılan bu işlemle üretilen Fe folyoların oksitlenmeden ve homojen bir şekilde ısıtılarak gerilimlerinin giderilmesi ve tavlanması hedeflenmiştir.

Üretilen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların karekterizasyonu için optik mikroskop ve SEM kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak üretilen folyolardan çıkarılan 0,5x1 cm ebatlarındaki numuneler epoksi reçine içerisine kalıplanmış ve ardından metalografik yöntemle (sırasıyla 400, 600 ve 1000 grit SiC kağıtları ile zımparalama ve ardından 6, 3 ve 1 mikron elmas içeren solüsyonlar ve bunlara uygun parlatma kumaşları ile parlatma ve %3 HNO_3 + %97 Etil Alkol içeren bir çözelti ile dağlama) hazırlanmıştır.

Üretilen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların korozyon hızını belirlemek için %3,5'luk tuz çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyon testi gerçekleştirilmiş ve Tafel eğrileri çıkarılmıştır. Korozyon hızı, aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilen korozyon akımı yoğunluğuna (i_{corr}) göre hesaplanmıştır.

$$CR = 3{,}27 \times 10\text{-}3\ (i_{corr}\ EW)/\rho \qquad (1)$$

Bu denklemde, CR korozyon hızı (mm/yıl), i_{corr} korozyon akımı yoğunluğu ($\mu A/cm^2$), EW eşdeğer ağırlık (Fe için 28 g/eq) ve ρ yoğunluktur (Fe için 7,87 g/cm^3).

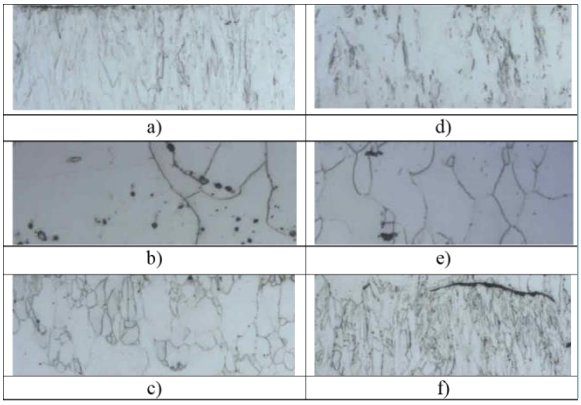
III. SONUÇLAR

Yapılan elektroforming işleminden sonra kaplanmış Ti plakanın (Şekil 2) kenarları zımpara ile alındığında oluşan kaplamanın kendiliğinden kalktığı görülmüştür. Bu şekilde Ag katkılı ya da katkısız elektroforming işlemleri sonrasında oldukça düzgün ve parlak yüzeyli saf demir folyolar elde edilmiştir.

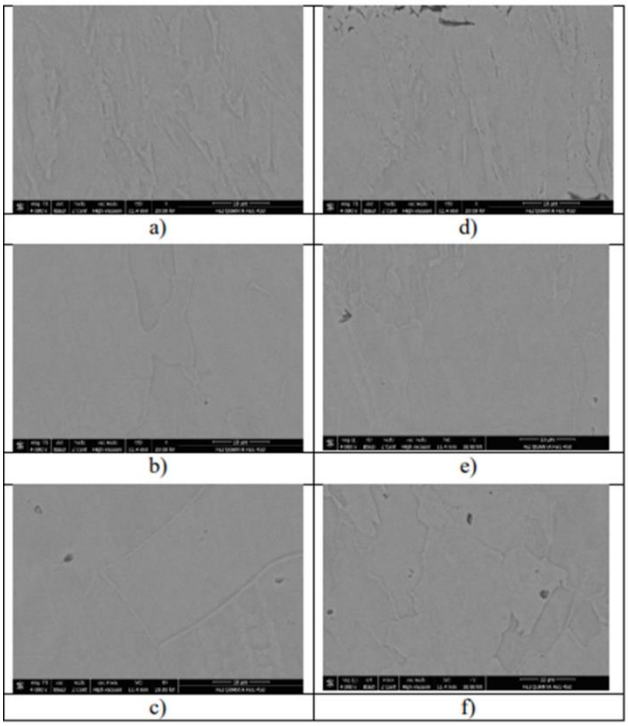


Şekil 2. Saf Fe kaplanmış Ti plaka.

Üretilen Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyalara ait optik mikroskop ve SEM kesit görüntleri sırasıyla Şekil 3 ve 4'teki gibidir.

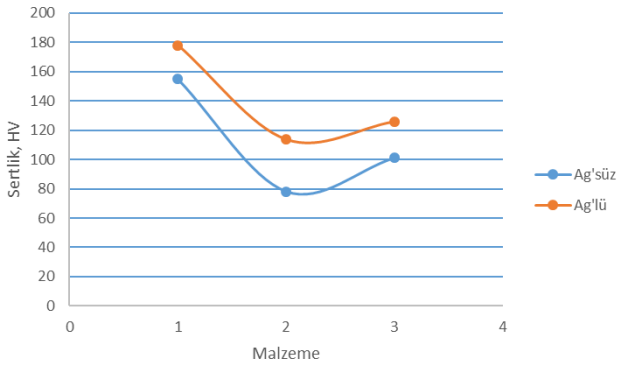


Şekil 3. Elektroforming ile üretile Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyalara ait optik mikroskop kesit görüntüleri; a) Gümüş katkısız saf Fe folyo, b) Gümüş katkısız 550°C'de gerilim giderme tavı görmüş saf Fe folyo, c) Gümüş katkısız 920°C'de normalize edilmiş saf Fe folyo, d) Gümüş katkılı saf Fe folyo, e) Gümüş katkılı 550°C'de gerilim giderme tavı görmüş saf Fe folyo, f) Gümüş katkılı 920°C'de normalize edilmiş saf Fe folyo.



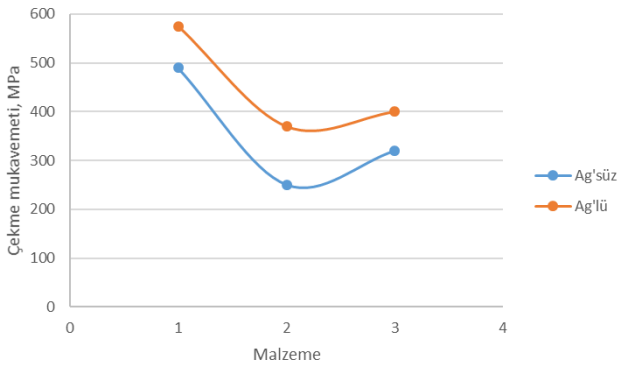
Şekil 4. Elektroforming ile üretile Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyalara ait SEM kesit görüntüleri; a) Gümüş katkısız saf Fe folyo, b) Gümüş katkısız 550°C'de gerilim giderme tavı görmüş saf Fe folyo, c) Gümüş katkısız 920°C'de normalize edilmiş saf Fe folyo, d) Gümüş katkılı saf Fe folyo, e) Gümüş katkılı 550°C'de gerilim giderme tavı görmüş saf Fe folyo, f) Gümüş katkılı 920°C'de normalize edilmiş saf Fe folyo.

Elektroforming ile üretilen ve tavlama işlemlerinden geçen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 5'teki gibidir.



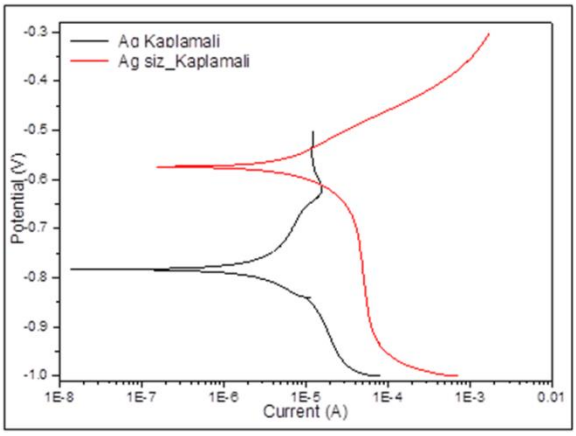
Şekil 5. Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların mikrosertlikleri. 1= Kaplanmış durumda, 2=550°C'de gerilim giderme tavlaması uygulanmış, 3=920°Cde normalize edilmiş.

Gerilim giderme ve normalizasyon ısıl işlemlerinde kullanılan sıvı Pb tavlama sonrasında tamamıyla Fe folyodan ayrılamadığından çekme testleri için ısıl işlem görmüş malzemelerden istenilen büyüklükte Fe folyolar elde edilememiştir. Bununla birlikte, sertlik değerleri DIN 50150 : Vickers sertliği, Brinell sertliği ve Rockwell sertliği dönüşüm tablosunda yerine konularak her bir malzemenin yaklaşık çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların çekme dayanımları. 1= Kaplanmış durumda, 2=550°C'de gerilim giderme tavlaması uygulanmış, 3=920°Cde normalize edilmiş.

Elektroforming ile üretilen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların korozyon hızları Şekil 7'deki Tafel eğrileriyle gösterilmiştir. Gerilim giderme ve normalizasyon ısıl işlemlerinde kullanılan sıvı Pb tavlama sonrasında tamamıyla Fe folyodan ayrılamadığından elektrokimyasal korozyon testleri yalnızca Ag katkılı ve katkısız saf Fe numuneler üzerinde gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 7. Elektroforming ile üretilen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyoların Tafel eğrileri.

Elektrokimyasal ölçüm sonuçlarına göre Ag katkısız saf demir folyonun korozyon hızı 0,5194 mm/yıl iken Ag katkılı saf demir folyonun korozyon hızı 1,725 mm/yıldır.

IV. TARTIŞMA

Sunduğu avantajlarla potansiyel olarak kardiovaskülar uygulamalarda çok sayıda çalışmaya esas teşkil eden biyobozunur demir esaslı stentlerde hala istenilen korozyon (bozunma) hızına ulaşılamamıştır. Bu çalışmada demir esaslı stent malzemelerdeki en büyük sıkıntı olan korozyon hızının çözümü için "galvanik çift oluşturma" konusunda Ag katkısının etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla üretilen Ag katkılı ve katkısız saf demir folyolara ısıl işlem uygulanmış, işlemler sonrasında üretilen malzmelerin mikroyapıları incelenmiş, mikrosertlikleri yapılarak mekanik özellikleri ölçülmüş ve korozyon özellikleri belirlenmiştir.

Elektroforming ile üretilen Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyaların optik mikroskop kesit görüntülerinde elektrokaplamalarda gözlenen tipi sütunsal yapıların oluştuğu gözlenmiştir [28]. Isıl işlem görmüş Ag katkılı ve katkısız saf Fe folyolarda eşeksenli yapılar gözlenirken, 550°C'dekine göre 920°C'de normalize edilmiş malzemelerde daha ince tane yapıları tespit edilmiştir. 550°C'deki eş eksenli tane yapısı, bu sıcaklıkta, mevcut kaplama gerilimleri altında bir yeniden kristalleşme ve ardından bir tane büyümesinin gerçekleştiğini göstermektedir. 920°C'de normalizasyon işlemi için ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında gerçekleşen $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümleri tane incelmesini sağlamıştır [30]

Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla yapılan sertlik ölçümleri ve buradan dönüştürme yoluyla belirlenen çekme dayanımları, electroforming ile üretilen saf demir malzemede belirgin bir stress birikiminin ortya çıktığını ve bu amaçla kullanılan sodium sakarinin bu görevi yeterli ölçüde yerine getiremediğini göstermektedir. 550°C'deki tavlama işlemi ile sertlik ve mukavemetin düşmesi bu streslerin giderildiğini göstermektedir. Oysa 920°C'deki normalizasyon işlemi sonrasında ortaya çıkan tane incelmesinin sertlik ve çekme dayanımında belirgin bir bir artışa yol açmıştır.

Elektrokimyasal korozyon ölçüm sonuçlarına göre, saf demir malzemenin korozyon hızı gümüş katkısı ile yaklaşık 3 katına ulaşmıştır. Bu, gümüş katkısı ile hedeflenen galvanik çift oluşumu mekanizmasın başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Gerilim giderme ve normalizasyon ısıl işlemlerinde kullanılan sıvı Pb tavlama sonrasında tamamıyla Fe folyodan ayrılamadığından yalnızca Ag katkılı ve katkısız saf Fe numuneler üzerinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testlerinde gerilim giderme ve normalizasyon işlemlerinin etkisi belirlenememiştir. Özellikle bu çalışmaya bir özgünlük katan normalizasyon işleminin yaratacağı tane boyutunu küçültme ve buna bağlı olarak artan tane sınırı içeriğinin mikrokorozyona katkısı bu çalışmada belirlenememiştir. Oysa, tane boyutu küçültülmüş içyapıların elektrokimyasal olarak daha aktif olduğu ve dolayısıyla zaman içinde korozyon hızı arttığı tespit edilmiştir [31].

V. ÇIKARIM

Elde edilen verilere dayanarak aşağıdaki çıkarımlarda bulunulabilir:

1. Elektrobiriktirme işlemi ile üretilen saf demir folyolarda Ag katkısı stent malzemesinin çözünürlük hızını arttırmaktadır. Bu durum, elektrobiriktirme işlemide Ag katkısının demir esaslı biyobozunur stent üretiminde potansiyel oluşturmaktadır.

2. Elektrobiriktirme işleminin yarattığı gerilimleri gidermek ve sünekliği arttırmak için yapılan gerilim giderme tavlaması ile mekanik sertlik ve çekme mukavemetinin düştüğü gözlenmiştir. Literatürde de gerilim giderme tavının korozyon hızını da düşürdüğü ifade edilmektedir.

3. Tane boyutunu küçültüp, kusur (tane sınırı) oranını arttırmak için yapılan normalizasyon işlemi sertlikte ve mukavemette yeniden bir artış yaratmıştır.

4. Tane boyutunun küçültülmesi, tane sınırlarının miktarını arttırdığından korozyon hızını da arttırdığı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2021-56354157-01 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi olarak Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Colombo A, Karvouni E. Biodegradable stents ‘‘fulfilling the mission and stepping away”. Circulation 2000;102:371–3.
[2] Di Mario C et al. Drug-eluting bioabsorbable magnesium stent. J Interv Cardiol 2004;17:391–5.
[3] Erne P, Schier M, Resink TJ. The road to bioabsorbable stents: reaching clinical reality? Cardiovas Interv Radiol 2006;29:11–6.
[4] Heublein B, Rohde R, Kaese V, Niemeyer M, Hartung W, Haverich A. Biocorrosion of magnesium alloys: a new principle in cardiovascular implant technology? Heart 2003;89:651–6.
[5] Zartner P, Cesnjevar R, Singer H, Weyand M. First successful implantation of a biodegradable metal stent into the left pulmonary artery of a preterm baby. Catheter Cardiovasc Interv 2005;66:590–4.
[6] Hermawan HD, Alamdari H, Mantovani D, Dubé D. Iron–manganese: new class of metallic degradable biomaterials prepared by powder metallurgy. Powder Metall 2008;51:38–45.
[7] Peuster M et al. A novel approach to temporary stenting: degradable cardiovascular stents produced from corrodible metal—Results 6–18 months after implantation into New Zealand white rabbits. Heart 2001;86:563–9.
[8] Peuster M, Hesse C, Schloo T, Fink C, Beerbaum P, Schnakenburg CV. Long-term biocompatibility of a corrodible peripheral iron stent in the porcine descending aorta. Biomaterials 2006;27:4955–62.
[9] W. Lin, L. Qin, H. Qi, D. Zhang, G. Zhang, R. Gao, H. Qiu, Y. Xia, P. Cao, X. Wang, W. Zheng, Long-term in vivo corrosion behavior, biocompatibility and bioresorption mechanism of a bioresorbable nitrided iron scaffold, Acta Biomater., 54 (2017), pp. 454-468.
[10] M. Schinhammer, A.C. Hänzi, J.F. Löffler, P.J. Uggowitzer, Design strategy for biodegradable Fe-based alloys for medical applications, Acta Biomater., 6 (5) (2010), pp. 1705-1713.
[11] J. Cheng, T. Huang, Y.F. Zheng, Relatively uniform and accelerated degradation of pure iron coated with micro-patterned Au disc arrays, Mater. Sci. Eng. C, 48 (2015), pp. 679-687.
[12] T. Huang, Y. Zheng, Uniform and accelerated degradation of pure iron patterned by Pt disc arrays, Sci. Rep., 6 (1) (2016), Article 23627.
[13] Y. Qi, H. Qi, Y. He, W. Lin, P. Li, L. Qin, Y. Hu, L. Chen, Q. Liu, H. Sun, Q. Liu, G. Zhang, S. Cui, J. Hu, L. Yu, D. Zhang, J. Ding, Strategy of metal–polymer composite stent to accelerate biodegradation of iron-based biomaterials, ACS Appl. Mater. Interfaces, 10 (1) (2018), pp. 182-192.
[14] E. Scarcello, D. Lison, Are Fe-based stenting materials biocompatible? A critical review of In vitro and in vivo studies, J. Funct. Biomater., 11 (1) (2020).
[15] A.A. Oliver, M. Sikora-Jasinska, A.G. Demir, R.J. Guillory, Recent advances and directions in the development of bioresorbable metallic cardiovascular stents: insights from recent human and in vivo studies, Acta Biomater., 127 (2021), pp. 1-23.
[16] H. Hermawan, D. Dubé, D. Mantovani, Development of degradable Fe-35Mn alloy for biomedical application, Adv. Mater. Res. 15-17 (2006) 107–112 .
[17] M. Schinhammer, A.C. Hanzi, J.F. Loffler, P.J. Uggowitzer, Design strategy for biodegradable Fe-based alloys for medical applications, Acta Biomater. 6 (5) (2010) 1705–1713 .
[18] B. Liu, Y.F. Zheng, Effects of alloying elements (Mn, Co, Al, W, Sn, B, C and on biodegradability and in vitro biocompatibility of pure iron, Acta Biomater. 7 (3) (2011) 1407–1420 .
[19] B. Liu, Y.F. Zheng, L. Ruan, in vitro investigation of Fe30Mn6Si shape memory alloy as potential biodegradable metallic material, Mater. Lett. 65 (3) (2011) 540–543 .
[20] T. Huang, J. Cheng, Y.F. Zheng, in vitro degradation and biocompatibility of Fe-Pd and Fe-Pt composites fabricated by spark plasma sintering, Mater. Sci. Eng.: C 35 (2014) 43–53 .
[21] J. ˇCapek, Š. Msallamová, E. Jablonská, J. Lipov, D. Vojt ˇech, A novel high-strength and highly corrosive biodegradable Fe-Pd alloy: structural, mechanical and in vitro corrosion and cytotoxicity study, Mater. Sci. Eng.: C 79 (2017) 550–562 .
[22] H. Wang, Y. Zheng, J. Liu, C. Jiang, Y. Li, in vitro corrosion properties and cy-tocompatibility of Fe-Ga alloys as potential biodegradable metallic materials, Mater. Sci. Eng.: C 71 (2017) 60–66 .
[23] S. Ravanbakhsh, C. Paternoster, G. Barucca, P. Mengucci, S. Gambaro, T. Lescot, P. Chevallier, M.A. Fortin, D. Mantovani, Improving the radiopacity of Fe-Mn biodegradable metals by magnetron-sputtered W-Fe-Mn-C coatings: applica-tion for thinner stents, Bioact. Mater. 12 (2022) 64–70 .
[24] H. Yang, X. Qu, M. Wang, H. Cheng, B. Jia, J. Nie, K. Dai, Y. Zheng, Zn-0.4Li alloy shows great potential for the fixation and healing of bone fractures at load-bearing sites, Chem. Eng. J., 417 (2021), Article 129317.

[25] Z. Zhang, B. Jia, H. Yang, Y. Han, Q. Wu, K. Dai, Y. Zheng, Zn0.8Li0.1Sr - a biodegradable metal with high mechanical strength comparable to pure Ti for the treatment of osteoporotic bone fractures: in vitro and in vivo studies, Biomaterials, 275 (2021), Article 120905.
[26] M.D. Cesare, H. Bixby, T. Gaziano, L. Hadeed, C. Kabudula, D.V. McGhie, J. Mwangi, B. Pervan, P. Perel, D. Piñeiro, S. Taylor, F. Pinto., Ed. E. Fox, World Heart Report 2023 Confronting The World's Number One Killer, 2023, https://world-heart-federation.org/wp-content/uploads/World-Heart-Report-2023.pdf
[27] M.A. Zain, R.T. Jamil, W.J. Siddiqui, Neointimal hyperplasia, StatPearls Publishing, Treasure Island, USA, 2022.
[28] M. Moravej, A. Purnama, M. Fiset, J. Couet, D.J. Mantovani, Electroformed pure iron as a new biomaterial for degradable stents: in vitro degradation and pre-liminary cell viability studies, Acta Biomater. 6 (5) (2010) 1843–1851 .
[29] X.X. Shen, M. Wu, D.M. Ji, Q.J. Xu, D.H. Cheng, The mechanical behavior of a layered nanostructured Ni with an alternating growth of ultrafine grains and nano-sized grains fabricated by electrodeposition, Mater. Sci. Eng.: A 713 (24) (2018) 43–51 .
[30] Z. Nasiri, S. Ghaemifar, M. Naghizadeh, and H. Mirzadeh, "Thermal Mechanisms of Grain Refinement in Steels: A Review," Metals and Materials International, 2020, https://doi.org/10.1007/s12540-020-00700-1
[31] S. Bagherifard, M.F. Molla, D. Kajanek, R. Donnini, B. Hadzima, M. Guagliano, "Accelerated biodegradation and improved mechanical performance of pure iron through surface grain refinement," Acta Biomaterialia, Vol. 98, 2019, pp. 88-102.