DÜZCE UNIVERSITY

■ FACULTY OF ENGINEERING
■ DÜZCE VOCATIONAL SCHOOL

6th INTERNATIONAL ENGINEERING RESEARCH SYMPOSIUM

6. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMALARI SEMPOZYUMU

INERS'26
INTERNATIONAL ENGINEERING RESEARCH SYMPOSIUM

BİLDİRİ KİTABI / *PROCEEDINGS BOOK*

ISBN: 978-625-6330-27-6

20. yıl ETKİNLİKLERİ



07-09 MAYIS/*MAY* **2026**

DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
CUMHURİYET KONFERANS SALONU

DÜZCE UNIVERSITY
CUMHURİYET CONFERENCE HALL

Abant İzzet Baysal University · Doğuş University İstanbul 1997 · Kocaeli University 1992 · Karabük University KBU 2007 · Zonguldak Bülent Ecevit University 1924 · YTÜ Yıldız Technical University · ATÜ 15. yıl

DÜZCE UNIVERSITY

Düzce University Konuralp Campus 81620 Centre DÜZCE / TÜRKİYE
PHONE: 0850 800 81 81 | FAX: 0380 542 11 03
DUZCE.EDU.TR

6th International Engineering Research Symposium

Full-Text Book

May 7-9, 2026
Düzce, Türkiye

ISBN
978-625-6330-27-6

Preface

6th International Engineering Research Symposium was held between 7-9 May 2026 with the hosting of Düzce University, Türkiye. Over 200 full-text papers and abstracts were submitted in 15 various engineering branches to the symposium. Approximately 138 of these papers were accepted for the presentation after the peer-reviews.

Thank you for your interest to the symposium.

INERS'26 Organization Committee

Committees

HONOR COMMITTEE

Mehmet Makas	Governer of Düzce
Dr. Faruk Özlü	Mayor of Düzce
Prof. Ahmet Alkan Çelik	Rector of Doğuş University
Prof. Eyüp Debik	Rector of Yıldız Technical University
Prof. Faruk Yiğit	Rector of Bolu Abant İzzet Baysal University
Prof. Fatih Kırışık	Rector of Karabük University
Prof. İsmail Hakkı Özölçer	Rector of Zonguldak Bülent Ecevit University
Prof. Nuh Zafer Cantürk	Rector of Kocaeli University
Prof. Nedim Sözbir	Rector of Düzce University

ORGANIZATION COMMITTEE

Prof. Ali Etem Gürel (Chair of the symposium)	Düzce University
Prof. Hüseyin Yılmaz	Yıldız Technical University
Prof. İsmail Rakıp Karaş	Karabük University
Prof. Elif Büyük Öğüt	Kocaeli University
Prof. Servet Karasu	Zonguldak Bülent Ecevit University
Prof. Ali Öztürkt	Düzce University
Prof. Emrah Evren Kara	Düzce University
Prof. Resul Kara	Düzce University
Prof. Yunus Biçen	Düzce University
Prof. Alper Ergün	Karabük University
Assoc. Prof. Hüseyin Bakır	Doğuş University
Assoc. Ümit Yurt	Bolu Abant İzzet Baysal University
Assoc. Prof. Ümit Ağbulut	Yıldız Technical University
Assoc. Prof. Enver Küçükkülahlı	Düzce University
Asst. Prof. Filiz Dursun	Düzce University
Res. Asst. Elif Eda Takgil	Düzce University
Res. Asst. Beyzanur Yavuz Abanoz	Düzce University

SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. İsmail Usta	Marmara University
Prof. Mustafa Sabri Özen	Marmara University
Prof. Metin Yüksek	Marmara University
Prof. Onur Balcı	Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Prof. Akif Keten	Düzce University
Prof. Elif Öğüt	Kocaeli University

Prof. Engin Özdemir	Kocaeli University
Prof. Faruk Aras	Kocaeli University
Prof. Hakan F. Öztop	Fırat University
Prof. Tahir Çetin Akıncı	İstanbul Technical University
Prof. İlyas Uygur	Düzce University
Prof. Hamit Saruhan	Düzce University
Prof. Hüsnü Gerengi	Düzce University
Prof. Suat Saridemir	Düzce University
Prof. Turgay Kıvak	Düzce University
Prof. Yusuf Çay	Sakarya University of Applied Sciences
Prof. Murat Karabacak	Sakarya University of Applied Sciences
Prof. Uğur Güvenç	Düzce University
Prof. Haldun Müderrisoğlu	Düzce University
Prof. Kenan Döşoğlu	Düzce University
Prof. Kemal Polat	Bolu Abant İzzet Baysal University
Prof. Mehmet Budakçı	Düzce University
Prof. Mert Yıldırım	Düzce University
Prof. Murat Kale	Düzce University
Prof. Salih Tosun	Düzce University
Prof. Erdem Cüce	Recep Tayyip Erdoğan University
Prof. Günnur Koçar	Ege University
Prof. Ahmet Selim Dalkılıç	Yıldız Technical University
Prof. Adnan Sözen	Gazi University
Prof. Mustafa Aktaş	Gazi University
Prof. Mehmet Yıldırım	Kocaeli University
Prof. Serkan Subaşı	Düzce University
Prof. Filiz Birbir Ünal	Düzce University
Prof. Pakize Erdoğmuş	Düzce University
Prof. Emine Malkoç	Düzce University
Prof. Şeref Keskin	Düzce University
Prof. Ali Çalhan	Düzce University
Prof. Celal Apay	Düzce University
Prof. Mehmet Emin Arslan	Düzce University
Prof. Fatih Taşpınar	Düzce University
Prof. Ali Naci Çelik	Bolu Abant İzzet Baysal University
Prof. Fuat Kara	Düzce University
Prof. Issouf Fofana	Université du Québec à Chicoutimi
Prof. Mehdi Seifbarghy	Alzahra University
Prof. Audrius Senulis	Klaipeda University
Prof. Kim Tiow Ooi	Nanyang Technological University
Prof. Rabah Gomri	Constantine University
Prof. Gaurav Saini	Harcourt Butler Technical University
Prof. Tikendra Nath Verma	Maulana Azad National Institute of Tech. Bhopal

Prof. Anh Tuan Hoang	Dong A University
Prof. Hitesh Panchal	Government Engineering College
Prof. Laveet Kumar	Mehran University of Engineering and Technology
Prof. A. Abu Siada	Curtin University
Prof. Deepenraj Balakrishnan	Prince Mohammad Bin Fahd University
Prof. Mehmet Emiroğlu	Sakarya University
Prof. Ali Ateş	Bolu Abant İzzet Baysal University
Prof. Ömer Özyurt	Bolu Abant İzzet Baysal University
Assoc. Prof. Hüseyin Cüce	Giresun University
Assoc. Prof. Fikret Polat	Düzce University
Assoc. Prof. Mustafa Sabri Ayyıldız	Düzce University
Assoc. Prof. Murat Bulut	Düzce University
Assoc. Prof. Serkan Apay	Düzce University
Assoc. Prof. Mert Kılınçel	Düzce University
Assoc. Prof. Ferzan Katırcıoğlu	Düzce University
Assoc. Prof. Engin Nas	Düzce University
Assoc. Prof. Benjamin Durakovic	International University of Sarajevo
Assoc. Prof. İsmail Koyuncu	Afyon Kocatepe University
Assoc. Prof. Menderes Kam	Düzce University
Assoc. Prof. Murat Ayaz	Kocaeli University
Assoc. Prof. Mustafa Karagöz	Karabük University
Assoc. Prof. Sait Eser Karlık	Bursa Uludağ University
Assoc. Prof. Sıtkı Akıncıoğlu	Düzce University
Assoc. Prof. Volkan Kırmacı	Bartın University
Assoc. Prof. Abid Ustaoğlu	Bartın University
Assoc. Prof. Cüneyt Uysal	Karabük University
Assoc. Prof. Şenol Şirin	Düzce University
Assoc. Prof. Tarık Gedik	Düzce University
Assoc. Prof. Melike Erdoğan	Düzce University
Assoc. Prof. İsmail İsa Atabey	Nevşehir Hacı Bektaş Veli University
Assoc. Prof. Serhat Çelikten	Nevşehir Hacı Bektaş Veli University
Assoc. Prof. Mustafa Dursun	Düzce University
Assoc. Prof. İrem Düzdar	Düzce University
Assoc. Prof. Talha Kabakuş	Düzce University
Assoc. Prof. Zehra Bozkurt	Düzce University
Assoc. Prof. Gürcan Samtaş	Düzce University
Assoc. Prof. Emin Yıldırız	Düzce University
Assoc. Prof. Behçet Dündar	Osmaniye Korkut Ata Univetsity
Assoc. Prof. Serdar Kırışoğlu	Düzce University
Assoc. Prof. Fatih Kayaalp	Düzce University
Assoc. Prof. Esra Şatır	Düzce University
Asst. Prof. Ömer Erkan	Düzce University
Asst. Prof. Yusuf Çilliyüz	Bilecik Şeyh Edebali University

Asst. Prof. Mehmet Duman	Düzce University
Asst. Prof. Mehmet Uçar	Düzce University
Asst. Prof. Yaşar Şen	Düzce University
Asst. Prof. Barış Kantoğlu	Düzce University
Asst. Prof. Tuğba Gürer	Düzce University
Asst. Prof. Münir Uçak	Düzce University
Asst. Prof. Fadime Öğülmüş Demircan	Düzce University
Asst. Prof. İbrahim Korkmaz	Düzce University
Asst. Prof. Halil Yılmaz	Bolu Abant İzzet Baysal University
Asst. Prof. Ali Mercan	Bolu Abant İzzet Baysal University
Asst. Prof. Mehmet Murat Topaç	Dokuz Eylül University
Asst. Prof. Murat Solak	Düzce University
Asst. Prof. Oğuzhan Demiryürek	Düzce University
Asst. Prof. Nilüfer Ülgüdür	Düzce University
Asst. Prof. İkrime Orkan Uçar	Düzce University
Asst. Prof. Emrah Yılmaz	Düzce University
Asst. Prof. Ahmet Albayrak	Düzce University
Asst. Prof. Ahmet Cihan	Düzce University
Asst. Prof. Büşra Takgil	Düzce University
Asst. Prof. Ekrem Başer	Düzce University
Asst. Prof. Gülsüm Yıldırız	Düzce University
Asst. Prof. Zafer Cingiz	Düzce University
Asst. Prof. Seymen Çiftçi	Düzce University
Asst. Prof. Süleyman Çeven	Düzce University
Dr. Gülden Kabakçi	Düzce University

Editors

Dr. Ali Etem Gürel
Dr. Gökhan Yıldız

ISBN
978-625-6330-27-6

Düzce, Türkiye

Contents

Preface ii

Committees iii

Editors vii

A Comparative Analysis of Machine Learning Models for Infant Cry Classification Using Feature Selection 1

Kardiyovasküler Risk Sınıflamasında Açıklanabilir ve Veri Sızıntısını Önleyen Makine Öğrenmesi Yaklaşımı 9

Comparison of Model Predictive Control and Time-Varying Linear Quadratic Regulator Techniques for Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots 16

5G Uyumlu 4.8 GHz Mikroşerit Yama Anten Tasarımı, Üretimi ve Radyasyon Örüntüsünün Karakterizasyonu 24

Giyilebilir Sağlık Teknolojilerinde Uç Birim Yapay Zekası (Edge AI) Tabanlı Adaptif Eşik Algoritması İle Gerçek Zamanlı Anomali Tespiti Ve Kinematik Düşme Analizi 29

Endüstriyel Yay Sistemlerinde Optimizasyon Çalışmalarının İncelenmesi 38

Akı Kontrollü Hibrit Rotor Yapısına Sahip Eksenel Akılı BLDC Motorun Performans Analizi 45

Yenilenebilir Enerji Entegreli İki Alanlı Yük Frekans Kontrolünde Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi 54

Laminar Akış Rejimindeki Fe3O4 - [C2mim][CH3SO3] İyonanoakışkanının Sabit Manyetik Alan Şartlarındaki Termo-Hidrolik Performansının Sayısal İncelemesi 62

Tedarik zincirlerindeki büyük veri yeteneklerini analiz etmek için Frematean bulanık karar destek sistemi için termodinamik bir yöntem 73

Aralık değerli Frematean bulanık sayılar için yeni bir sıralama yöntemi ve üç yönlü bir karar modeli 81

Sentinel-2 Görüntüleri Kullanılarak Akdeniz Yangın Ortamlarında ΔNBR Eşik Değerlerine Göre Yanmış Alan Tahmini Duyarlılığının İncelenmes 88

Hidrolik Disk Frenlerde Piston Geri Getirme Miktarının Sonlu Elemanlar Analizleri ile İncelenmesi 96

NFC Tabanlı Sistemler için İnovatif Kilit Mekaniği Tasarımı: EcoKey 102

İklim Değişikliğinin Turizm Sektörüne Etkilerinin AI ile Analizi 112

Elektropolisaj Sonrası Pasivasyon Parametrelerinin Yüzey Parlaklığı ve Korozyon Direnci Üzerine Etkilerinin İncelenmesi 123

Paslanmaz Çelik Üzerine Farklı Kaynak Akımlarında Stellite 21 Kaplanması 132

Düşük Voltajlı Karbon Fiber Rezistans Entegrasyonunun LVL Tabanlı Oturma Elemanlarında Termal Performansının Ön Değerlendirmesi 139

Düzce-Beyköy Geleneksel Konutlarında Kullanılan Yapı Malzemelerinin İncelenmesi 144

Eklemeli İmalatla Üretilmiş Bakır Elektrotların Elektro Erozyon İşleminde Aşınma Hızlarının İncelenmesi 151

Düz Bir Yüzeyde Taşınım Katsayısının Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi 158

Boron-Sülfon Bazlı Floresan Malzeme Sentezi ve OLED Uygulaması 164
Kentiçi Arterlerde Trafik Kaynaklı CO_2 Emisyonlarının LSTM Derin Öğrenme Modeli ve Sentetik Verilerle Tahmini 173
Türkçe Phishing E-Postalarının Tespiti İçin Gerçek ve Sentetik Veri Destekli Makine Öğrenmesi ve BERT Tabanlı Bir Yaklaşım 177
NFC Enerji Hasatlı Bataryasız Akıllı Kilit Sistemi için Mobil Uygulama Entegrasyonu: EcoKey 192
Python Programlama Eğitiminde RAG Destekli ve Adaptif Öğrenme Tabanlı Sanal Öğretmen Asistanı 201
Kaba Tel Çekme Sisteminden Çıkan Değerli Atığın Mekanik ve Kimyasal Hibrit Yaklaşımlarla Dizayn Edilen Sistem Kullanılarak Geri Kazanılması 206
6000 Serisi Alüminyumlarda Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretimin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi 216
Yorumlanabilirlik ve Etik Perspektifiyle Görüntü İşleme Modellerinin Şeffaflığı: Kuramsal Bir Analiz 227
Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Seramik Membran Proseslerinin Uygulanması 234
Dijital Dezenformasyonla Mücadelede MD5 Doğrulama Tabanlı Video Kesit Analizi ve Doğrulama Sistemi 240
Kentsel Sorunların Dijital Haritası 246
EEG Tabanli Zihinsel Aritmetik Gorevi Sirasinda Beyin Aktivitesinin Spektral Analizi 254
Spor Alanındaki Bireysel Ölçümlerde Sensör ve Gps Kullanımı 259
3B Multipl Skleroz Lezyon Segmentasyonu için Lezyon-Duyarlı Örnekleme ve Aşamalı Transfer Öğrenme 263
Tabular Verilerde Sinyal İşleme Filtrelerinin Uyku Bozukluğu Sınıflandırması Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi 270
Akıllı Katı Atık Ayrıştırma Sistemlerinin İncelenmesi 282
Techliff: Web için Yapay Zeka Destekli Makine Mühendisliği Teklif Uygulaması 288
Prefabrik Yapı Elemanları Üretiminde Enerji ve Kaynak Verimliliğinin Değerlendirilmesi: Bir Uygulama Örneği 293
Pratik Duygu Tanıma İçin Klinik EEG ve Beyin Bilgisayar Arayüzü Sistemlerinin Karşılaştırılması 299
Siber Güvenlikte Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Tabanlı Saldırı Tespit Sistemlerinin Son On Yıldaki Gelişimi (2015-2025) 308
Uzun Süreli Uçuş İçin Leylekten İlham Alan Biyomimetik Kanat Profili Tasarımı 316
Yeni Nesil Bis-Kalkon Ester Türevinin Sentezi, Korozyon ve Biyolojik Özelliklerinin İncelenmesi 327
Kelkit Havzasında Sıcaklık ve Nem Etkileşimi Altında İklim Değişikliği Eğilimleri 336
Geliştirilmiş Rahim Ağzı Kanseri Tarama Tahmini İçin Özellik Dikkatli Hibrit Dengesizlik Duyarlı Topluluk Modeli (HIE-FA) 343

Eklemeli İmalatla Üretilen PLA-CF Malzemenin Mekanik Performansının İncelenmesi 349
Web Uygulaması Güvenliği için Büyük Dil Modellerinin Değerlendirilmesi: Çok Senaryolu Bir Güvenlik Açığı Tespiti Çalışması 359
Yapay Zeka Tekniklerinin Çevresel Sistemlerin Yönetimindeki Rolü: Güncel ve Eleştirel Bir Değerlendirme 366
Okuma Yazma Bilmeyen 4-7 Yaş Grubu Çocuklar İçin Sesli Komut Destekli Mobil İngilizce Kelime Öğretim Uygulaması Geliştirilmesi 373
Fingerprinting Yöntemi ile BLE Beacon ve RFID Tabanlı Hibrit Kapalı Alan Navigasyon Sisteminin Simülasyon Tabanlı Geliştirilmesi 380
Atıl Arazileri Ekonomiye Kazandırılma Portalı: AraziBul 387
Biyometrik Sistemlerde Parmak İzi Verilerinin Kriptografik Yöntemlerle Korunması 394
Transformer Tabanlı Dil Modelleri Kullanılarak Sahte Haberlerin Tespiti Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma 408
Yazlık Triko Giysiler İçin Sinek Kovma Özelliklerinin Geliştirilmesi 414
Silis Kumu Zenginleştirme Keki Esaslı Pişmiş Tuğla Özelliklerinin Araştırılması 420
Düz Bir Endüstriyel Yüzeyde Farklı Yalıtım Malzemeleri ve Kalınlıklarının Isıl ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi 426
Comparative Analysis of the Effects of PET and PBT Chips on Draw Textured Yarn (DTY) Production Performance 433
Derin Evrişimli Sinir Ağları ve Vektörel Benzerlik Metrikleri ile Bir Otomatik Pişirme Planlaması Sistemi Tasarımı 439

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

A Comparative Analysis of Machine Learning Models for Infant Cry Classification Using Feature Selection

Babur Yalqem, Tunahan Timuçin*

Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** babur.yalqem@gmail.com

ABSTRACT

Infant cry classification is an important research area for early childcare and health monitoring, as it enables the identification of infants' needs such as hunger, pain, and discomfort. However, strong acoustic similarities between different cry types and class imbalance in datasets make this task challenging for machine learning models. This study investigates the implementation and evaluation of multiple machine learning algorithms for infant cry classification using the Donate-A-Cry dataset. The dataset was preprocessed through feature scaling and class balancing using the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE). Furthermore, a feature selection method based on Random Forest importance was applied to identify the most relevant acoustic features, particularly MFCC and spectral characteristics. Several machine learning models, including Support Vector Machine (SVM), Random Forest, K-Nearest Neighbors (KNN), Logistic Regression, Decision Tree, and Naive Bayes, were trained and evaluated using accuracy and F1-score metrics. The experimental results indicate that SVM achieved the best overall performance with an accuracy of 83.7% and an F1-score of 76.3%, while Random Forest showed strong capability in detecting minority classes. Future work will focus on improving infant cry classification using deep learning models (CNN, LSTM), transfer learning approaches, temporal modeling, explainable AI techniques, and validation on external datasets such as ICSD.

Keywords: *Infant cry classification, Machine learning, Feature selection, Class imbalance.*

I. INTRODUCTİON

Infant crying is one of the initial ways throught which infants communicate and express themselfs during the first months of life and crying becomes their primary way of expressing their needs such as hunger, pain, discomfort, or tiredness. For parents and caregivers, understanding the meaning of a baby's cry is very important, because a quick and correct response can improve infant care and support healthy emotional development. At the same time , many cry types sound very similar, in practice, interpreting infant cries is not always easy which often complicates the tasks even for experienced caregivers to determine what the baby needs.

Because of this challenge, infant cry classification has become an important research topic in recent years, in particular, in the fields of healthcare, audio signal processing, and artificial intelligence. Experts have examined the use of machine learning techniques to automatically analyze infant cries and identify the reason behind them[1],[2]. These systems can be useful in supporting parents, helping healthcare providers in early infant assessment. Despite all the progress has been done in this area ,still classification of infant cry is a challenging endeavor . Different cry categories, such as hunger, pain, and discomfort which often share very similar acoustic patterns is the main cause of this challenge. Scholars belive the similarity increases the possibility of misclassification and reduces model reliablity as well.

Small and imbalanced datasets are another challenges in this area as most infant cry datasets are small in size and not balnce, where some cry categories contain significantly more samples than others , which this causes difficulties during model learning, as machine learning algorithms learn dominant classes better but struggle with minority classes. As a result, a model may show high overall accuracy but fail to correctly identify less frequent but important cry types.

In order to address these issues , Donate-A-Cry dataset is used to examine the use of various machine learnig models for infant cry classification. Initially, the pre-processed on our database is performed through feature scaling and class balancing using the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE), later on feature selection is applied using Random Forest importance in order to identify the most informative acoustic features and remove less useful ones, finally, several machine learning models, including Support Vector Machine (SVM), Random Forest, K-Nearest Neighbours (KNN), Logistic Regression, Decision Tree, and Naive Bayes, are trained and evaluated.

In this study our main objective is to compare the performance of these machine learning models and identify which approach performs best under imbalanced and acoustically similar infant cry conditions. The findings of this study provide a useful machine learning baseline for classifying infant cry and may support future research involving deep learning and more advanced audio analysis techniques.

II. Related Works

Classifying Infant cry has become an important field of study for early child monitoring systems and healthcare. Previous studies shows that machin learning and acoustic feature extraction methods have been investigated to enhance recognation of infant cry pattern.

In order to demonstrate the importance of acoustic feature representation in cry classification tasks Sita Purnama Dewi et al. [1] proposed the use of Linear Frequency Cepstral Coefficients (LFCC) for feature extraction, including cepstral values, pre-emphasis, and filter bank analysis. Infant cry anaylysis has als been studied using multiple deep learning approaches. Y. Lavner et al. [2] used Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) and Convolutional Neural Networks (CNN) to developed deep learning-based algorithms. Their study showed the efficacy of deep learning techniuqes for audio classification issues by demonstrating that CNN-based classification outperfromed Logistic Regression. R. Cohen and Y. Lavner [3] proposed a two-stage infant cry classification system in which MFCC and energy-based acoustic features were extracted before applying the K-Nearest Neighbor (KNN) classifier.

With emphasizing the importance of preprocessing and noise handling in infant cry analysis, their work also evaluated the robustness of the system under noisy conditions. At the same time comparative studies between LFCC and MFCC further demonstrated the effectiveness of acoustic feature extraction methods in cry recognition systems which shows that in order to reduce classification error and imporving recognition performance, combining LFCC and MFCC features may be quite helpful. [4]

In addition, previuos studies has also explored the hybrid machine learning and neural network approaches for infant cry classification. O. F. Reyes-Galaviz et al. [5] presented a hybrid system to analys acoustic feature using feed-forward neural networks with back-propagation algorithms. MFCC-based acoustic features combined with machine learning models such as SVM have demonstrated effective performance, particularly in limited-data environments [6]. These findings support the use of feature selection and acoustic feature engineering in infant cry classification tasks.

Infant cry classification has also been investigated for early healthcare monitoring and automatic diagnosis systems. Previous studies reported that machine learning models such as Support Vector Machine (SVM) achieved strong performance in infant cry analysis tasks [7]. In addition, systems based on Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) and SVM have been successfully applied for automated infant cry analysis using smartphones and wearable devices .

Acoustic feature extraction plays a critical role in infant cry classification systems, where MFCC features are widely used because they effectively represent short-time spectral information and are more robust than traditional Linear Predictive Coding (LPC) features . Additionally, prosodic features such as pitch, intensity, formants, and duration have been identified as important acoustic cues for distinguishing different infant cry patterns [4],[8].Morever, previous studies reported that relying solely on MFCC or LPC features without incorporating higher-level prosodic information may reduce the discriminative capability of classification models [8].

Despite all the progress in infant cry analysis research, still several limitations remain as an example many previous studies insufficiently addressed class imbalance problems and often lacked comprehensive comparisons across multiple machine learning classifiers under consistent preprocessing conditions.

Based on the literature, three major research gaps can be identified, first, class imbalance remains insufficiently addressed in many infant cry classification studies. Second, feature selection has not been explored sufficienlty despite its importance in reducing noisy or redundant features and third, still there is limited comparative evaluation across multiple machine learning classifiers under the same preprocessing conditions. Therefore, this study focuses on addressing these limitations through SMOTE-based class balancing, Random Forest-based feature selection, and comparative evaluation of multiple machine learning models including SVM, Random Forest, KNN, Logistic Regression, Decision Tree, and Naïve Bayes for infant cry classification.

III. METHODOLOGY

In this study follows a machine learning-based framework for infant cry classification which is designed to address two major challenges in infant cry analysis: class imbalance and acoustic similarity between cry categories. The overall methodology in this study is consists of five main stages: data preparation, preprocessing, feature selection, model training, and performance evaluation.

A. Datasets

In this study Donate-A-Cry dataset is used as the primary source for model training and evaluation. This dataset is a real word ,publicly available infant cry dataset collected through a mobile application, where parents uploaded infant cry recordings using thier smartphones , the dataset was introduced as part of the Donate-A-Cry initiative for infant cry analysis research and healthcare monitoring applications. As shown in Table 1, these recordings were processed into a structured feature-based dataset containing 457 samples and 27 acoustic features whcih each sample represents one infant cry instance and is labeled according to one of five cry categories: belly pain, burping, discomfort, hungry, and tired. Additionally, the extracted features include commonly used acoustic descriptors such as RMS, ZCR, STFT, spectral features, and MFCC coefficients, which provide meaningful representations of infant cry signals for machine learning classification.

The Donate-A-Cry dataset is used in our study as it is well suited for supervised infant cry classification because it provides labeled acoustic features that can be directly used for model training and evaluation. The dataset also presents important challenges, like , the class distribution is highly imbalanced, with some categories containing significantly fewer samples than others, which may bias model performance toward majority classes and , since the recordings were collected in uncontrolled real-world environments, background noise and recording variability may affect feature quality and reduce classification reliability but despite these limitations, Donate-A-Cry remains a practical and widely used benchmark for infant cry classification studies due to its accessibility, labeled structure, and relevance to real-world infant monitoring applications.

Table 1. Summary of datasets used in this study

Dataset	Purpose in Study	Size	Classes / Labels	Key Characteristics
Donate-A-Cry	Primary training and evaluation	457 samples, 27 features	5 cry classes (belly pain, burping, discomfort, hungry, tired)	Feature-based, labeled, imbalanced, real-world recordings

B. Data Preprocessing

Before model training, several preprocessing steps has been applied to improve data quality and ensure reliable machine learning performance.

B.1. Acoustic Feature Extraction

The Acoustic feature extraction is performed to obtain a meaningful representations of infant cry signals for machine learning classification, in addition, categorical infant cry labels also were encoded into numerical representations to enable machine learning model training. Also several commonly used audio descriptors, such as Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Zero Crossing Rate (ZCR), Short-Time Fourier Transform (STFT), Root Mean Square (RMS), and spectral features used in this work.

MFCC features is used to capture the frequency characteristics of infant cries based on human auditory perception whihch are widely applied in speech and audio classification tasks, the ZCR descriptor was utilized to measure the rate of signal sign changes, which helps represent the noisiness and temporal characteristics of audio signals , STFT is applied to analyze the time-frequency representation of infant cries, allowing the extraction of spectral information across short time intervals and RMS was used to measure the energy and intensity of the cry signal, while spectral descriptors provided additional information regarding frequency distribution and acoustic variations within the audio recordings.

These acoustic features provide important information for distinguishing different infant cry categories and improving the effectiveness of machine learning classification models.

B.2. Feature Scaling

Before model training, feature scaling has been applied to normalize the extacted axoustic features using the StandardScaler. The reason for selecting StandardScaler is because it standardizes features to zero mean and unit variance, making it suitable for machine learning classifiers such as SVM, KNN, and Logistic Regression, which are sensitive to feature magnitude and distance calculations so compared to alternative

scaling methods, StandardScaler provided stable feature normalization while preserving the distribution characteristics of the acoustic features.

B.3. Smote-Based Dataset Balancing

As we discussed ealier , one of the major challenges of the Donate-A-Cry dataset was class imbalance, where some infant cry categories contained significantly fewer samples than others, this imbalance can bias machine learning models toward majority classes, causing poor classification performance on minority cry categories. To address this issue, we applied the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE to generate synthetic samples for minority classes and create a more balanced dataset.

SMOTE was selected because it generates new synthetic samples instead of simply duplicating existing minority samples, which helps reduce overfitting and improves model generalization also compared to random oversampling techniques, SMOTE provides more effective balancing by creating new feature representations between neighboring minority samples. Additionally, unlike undersampling methods that remove majority class data, SMOTE preserves all available training information while improving minority class representation.

The use of SMOTE in this study , improved the learning capability of the machine learning models by reducing bias toward dominant classes and enhancing classification performance across all infant cry categories so this balancing process was particularly important for improving minority class detection and obtaining more reliable evaluation results for the imbalanced infant cry dataset.

B.4. Feature Selection

After dataset balancing step ,moving on feature selection is performed using Random Forest feature importance to identify the most informative acoustic features and reduce the influence of noisy or redundant inputs. The extracted acoustic features, including MFCC, ZCR, STFT, RMS, and spectral descriptors, contain different levels of contribution to infant cry classification liek some features provide highly discriminative information, while others may introduce noise or unnecessary complexity into the learning process.

The reason for selecting Random Forest feature importance and not the alternatives was because it can automatically evaluate the contribution of each feature to the classification task based on decision tree learning. During training, the Random Forest model measures how much each feature helps reduce classification error across multiple decision trees and assigns an importance score to every feature, the features with higher importance scores contribute more significantly to classification performance, while less important features can be removed.

Compared to alternative feature selection methods such as correlation-based filtering or Principal Component Analysis (PCA), Random Forest feature importance provides better interpretability because it preserves the original feature meaning and directly identifies which acoustic features are most relevant for infant cry classification , at the same time , Random Forest can effectively handle nonlinear relationships between acoustic features and class labels, making it suitable for complex audio classification tasks.

The use of Random Forest feature importance improved preprocessing by reducing redundant and noisy features, decreased the computational complexity, and allowed the machine learning models to focus on the most discriminative acoustic characteristics of infant cries, this process also contributed to improving classification stability and overall model performance.

B.5. Dataset Spitting

In order to maintain class distribution across all infant cry categories, our dataset is splitted into trainig, validationand testing subsets using stratified sampaling techniuqe. In which about 70% of the dataset was used for training the models, 10% for the validation phase and remaining 20% fro testing and final evaluation.

The validation set was used for model tuning and performance monitoring, while the testing set was reserved for unbiased evaluation of the trained models. Stratified splitting is applied to ensure fair model comparison under imbalanced class conditions.

C. Machine Learning Models

As discussed, several machine learning models were selected to evaluate infant cry classification performance under imbalanced and acoustically similar conditions, these models selected as each represent different learning mechanisms and allows comprehensive comparison across linear, probabilistic, distance-based, and ensemble-based classification approaches.

C.1. Support Vector Machine (SVM)

SVM was used in this study becuase the Support Vector Machine has strong performance in high-dimensional classification tasks and its effectiveness with acoustic feature-based datasets. It works by finding the optimal decision boundary between different cry categories and is particularly suitable for complex feature relationships such as MFCC and spectral descriptors, also compared to simpler linear models, SVM provides better generalization and robustness for infant cry classification.

C.2. Random Forest

Random Forest is another model was selected due to its ability to handle nonlinear feature relationships and reduce overfitting through ensemble learning, unlike a single Decision Tree, Random Forest combines multiple decision trees to improve classification stability and accuracy,additionally, Random Forest provides feature importance analysis, which was also utilized during the feature selection stage of preprocessing.

C.3. K-Nearest Neighbors (KNN)

K-Nearest Neighbors was included because of its simplicity and effectiveness in distance-based classification tasks , it classifies infant cries by analyzing the similarity between neighboring acoustic feature samples, since acoustic features with similar cry patterns tend to cluster together, KNN provides a useful baseline model for evaluating cry similarity classification performance.

C.4. Logistic Regression

Logistic Regression is used in this study as a lightweight and computationally efficient baseline classifier,this model estimates class probabilities using linear decision boundaries and provides interpretable classification behavior, although simpler than nonlinear approaches, Logistic Regression allows effective comparison between linear and more complex machine learning methods.

C.5. Decision Tree

Decision Tree was selected because of its interpretability and ability to model decision-making processes through hierarchical splitting rules. It can understand nonlinear relationships between acoustic features and cry categories and providing clear classification logic at the same time, unlike Random Forest, single decision trees overfits easily and this property make them useful for baseline comparison.

C.6.Naïve Bayes

Naive Bayes has probabilistic learning mechanism .the modelp do classification based on probablity estimation and assumes there is independence between features . Although this assumption may simplify complex acoustic relationships. Naïve Bayes provides fast training and serves as an effective model for comparing with more advanced classifiers.

D. Model Training and Evaluation

In this study, each machine learning model was trained with the training subset and evaluated them using the validation and testing subsets , then an overall performance evaluation has been conducted using Accuracy and F1-score metrics. the overall percentage of correctly classified samples is measured with accuracy metrics and the F1-score provides a balanced evaluation of precision and recall which is essential metric for imbalanced datasets. The reason we selected these evaluation metrics is to ensure fair comparison between models and reliable assessment of classification performance.

D.1. Experimental Setup

All the experiment has been done in Python using the Scikit-learn and Imbalanced-learn libraries. Our dataset splitted into training, validation, and testing subsets using a stratified splitting strategy to preserve class distribution across all infant cry categories . Approximately 70% of the dataset is allocated for training, 10% for validation, and 20% for testing.

Feature scaling is performed using StandardScaler before the model training and to address class imbalance, the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) was applied only to the training set to prevent data leakage and improve minority class representation and after balancing, Random Forest-based feature selection was performed to identify the most informative acoustic features.

Multiple machine learning classifiers, including SVM, Random Forest, KNN, Logistic Regression, Decision Tree, and Naïve Bayes, were trained and evaluated under the same preprocessing conditions to ensure fair comparison.

D.2. Experimental Workflow

Fig. 1 illustrates the overall experimental workflow used for infant cry classification, including preprocessing, dataset balancing, feature selection, machine learning model training, and performance evaluation.

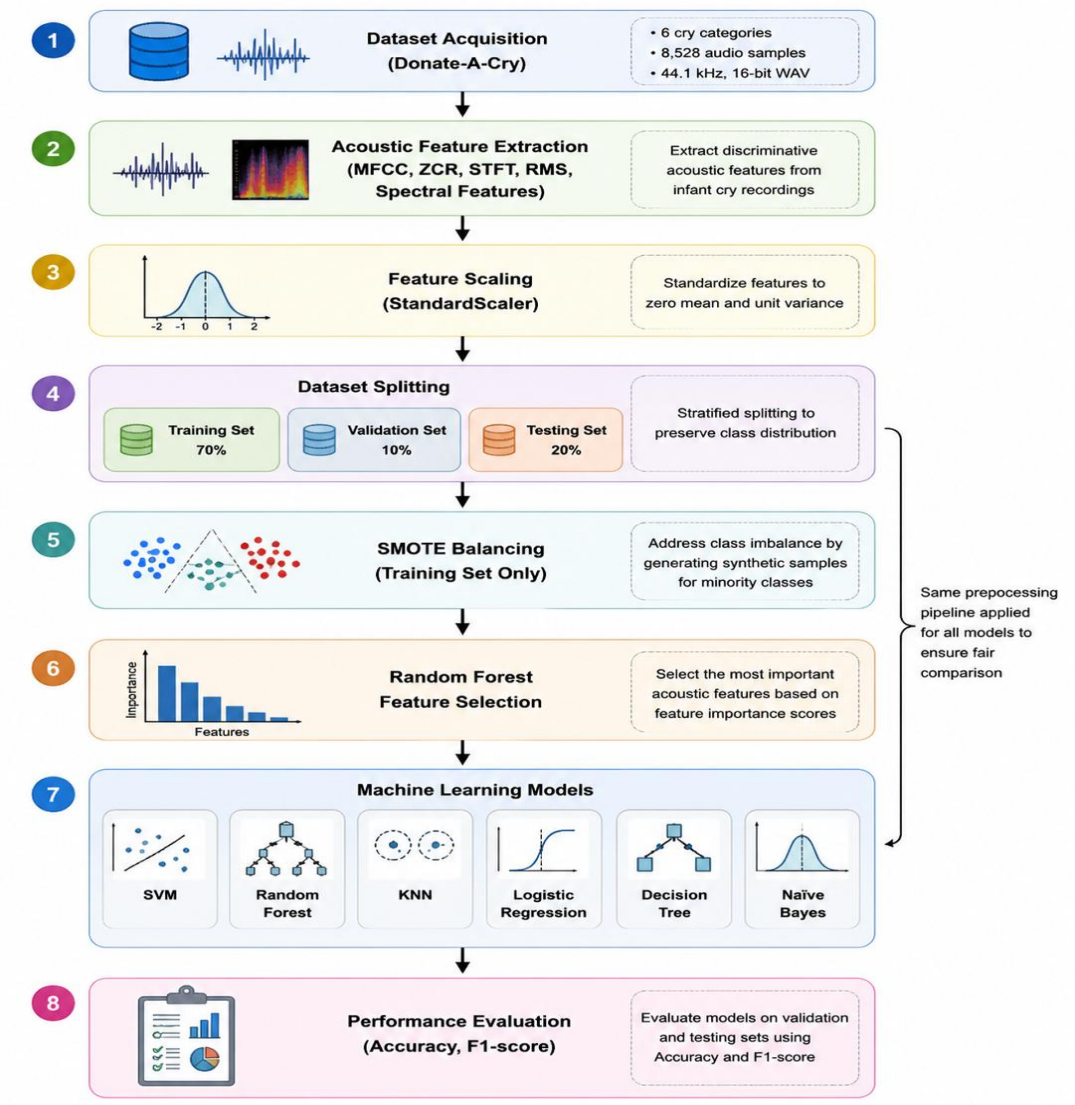


Figure 1. Experimental Workflow for Infant Cry Classification Using Machine Learning Models

IV. RESULT AND DISCUSSION

A. *Machine Learning Model Performance*

In this study, the performance of the machine learning models is evaluated using Accuracy and F1-score metrics on the testing dataset, the Table 2, shows the comparative performance results obtained from the infant cry classification experiments.

Table 2. M.L. Model comparative performance result

Model	Accuracy (%)	F1-score (%)
Support Vector Machine	72.83	72.36
Random Forest	**78.26**	**73.94**
K-Nearest Neighbors	34.78	44.82
Logistic Regression	39.13	48.89
Decision Tree	68.48	72.05
Naive Bayes	53.26	62.62

Our experimental results show that Random Forest achieved the best overall classification performance with an accuracy of 78.26% and an F1-score of 73.94%, the strong performance of Random Forest shows that ensemble learning methods are effective in handling complex and nonlinear acoustic relationships within infant cry signals, additionally, the use of multiple decision trees improved classification stability and reduced overfitting compared to single-tree approaches.

On the other hand, Support Vector Machine also demonstrated strong classification capability, achieving 72.83% accuracy and 72.36% F1-score,this result suggests that SVM effectively handled the high-dimensional acoustic feature space generated from MFCC and spectral descriptors also the balanced class weighting strategy additionally contributed to improving minority class recognition performance under imbalanced dataset conditions.

The results further shows us that simpler models such as K-Nearest Neighbors and Logistic Regression achieved significantly lower performance , the KNN model obtained the lowest classification accuracy of 34.78%, while Logistic Regression achieved 39.13% accuracy. Overall, the results we achived suggest that infant cry categories contain overlapping and complex acoustic patterns that are difficult to separate using simple distance-based or linear decision boundaries.This observation supports the core challenge addressed in this study, namely the acoustic similarity between different infant cry categories.

Although Decision Tree achieved relatively competitive F1-score performance, its overall accuracy remained lower than Random Forest,this indicates that ensemble learning approaches provide better generalization capability than single-tree classifiers for infant cry classification tasks, similarly, Naive Bayes achieved moderate performance but was limited by its independence assumptions between acoustic features.

B. Feature Importance Analysis

Based on our experiments, shown in the Table 3, Random Forest feature importance analysis revealed that MFCC-based features, STFT representations, and spectral descriptors were among the most discriminative acoustic features for infant cry classification, particularly, MFCCs13, STFT_Mean, and spectral contrast features achieved the highest importance scores, this indicates that frequency-domain and time-frequency acoustic characteristics play a significant role in distinguishing infant cry categories.

Table 3. Random Forest-Based acoustic feature importance scores

Feature	Importance Score
MFCCs13	**0.0689**
STFT_Mean	0.0657
SCON_Mean	0.0613
del2MFCCs13	0.0596
MFCCs5	0.0501
RMS_Mean	0.0488
ZCR_Mean	0.0473
MFCCs13Mean	0.0453

The feature importance results demonstrate that both spectral and temporal acoustic information contribute significantly to infant cry classification performance, specifically , the dominance of MFCC-related features confirms the effectiveness of acoustic feature engineering for representing infant cry patterns, also the contribution of RMS, ZCR, and spectral descriptors indicates that signal energy, frequency variation, and temporal dynamics are also important factors for distinguishing acoustically similar cry categories.

Overall, the experimental findings shows that preprocessing techniques such as StandardScaler normalization, SMOTE-based balancing, and Random Forest feature selection contributed positively to classification performance. The study further shows that ensemble and nonlinear machine learning models are more suitable for infant cry classification compared to simpler linear or distance-based approaches.

V. CONCLUSİON

This study presented a machine learning-based framework for infant cry classification using acoustic feature analysis and preprocessing techniques, multiple machines learning models, including Support Vector Machine, Random Forest, K-Nearest Neighbors, Logistic Regression, Decision Tree, and Naive Bayes, were trained and evaluated using the Donate-A-Cry dataset. To improve the classification performance and to reduce the effect of class imbalance, preprocessing techniques such as StandardScaler normalization, SMOTE-based balancing, and Random Forest-based feature selection were also applied.

Our experimental results showed that Random Forest achieved the best overall classification performance with 78.26% accuracy and 73.94% F1-score, while Support Vector Machine also showed strong and stable performance for high-dimensional acoustic feature classification. Our findings further revealed that MFCC-based features, STFT representations, and spectral descriptors were among the most important acoustic features for distinguishing infant cry categories, in contrast, simpler linear and distance-based models such as Logistic Regression and K-Nearest Neighbors showed weaker performance due to the complex and overlapping acoustic characteristics of infant cry signals.

Overall, the study shows the importance of preprocessing, class balancing, and acoustic feature engineering in improving infant cry classification performance under imbalanced and acoustically similar conditions. The proposed framework in this study, establishes a reliable machine learning baseline for future infant cry analysis research. In the future work our focus is on the integration of deep learning and temporal modeling approaches such as CNN, LSTM, and Audio Spectrogram Transformer (AST) models, as well as explainable AI techniques and cross-dataset evaluation using external infant cry datasets such as ICSD.

REFERENCES

[1] S. P. Dewi, A. L. Prasasti, and B. Irawan, "Analysis of LFCC Feature Extraction in Baby Crying Classification using KNN," in *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)*, Bali, Indonesia, 2019, pp. 86–91.

[2] Y. Lavner, R. Cohen, D. Ruinskiy, and H. Ijzerman, "Baby Cry Detection in Domestic Environment Using Deep Learning," in *2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE)*, Eilat, Israel, 2016, pp. 1–5.

[3] R. Cohen and Y. Lavner, "Infant Cry Analysis and Detection," in *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, Eilat, Israel, 2012, pp. 1–5.

[4] S. P. Dewi, A. L. Prasasti, and B. Irawan, "The Study of Baby Crying Analysis Using MFCC and LFCC in Different Classification Methods," in *2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, 2019, pp. 19–24.

[5] O. F. Reyes-Galaviz, S. D. Cano-Ortiz, and C. A. Reyes-García, "Evolutionary-Neural System to Classify Infant Cry Units for Pathologies Identification in Recently Born Babies," in *7th Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI)*, 2008, pp. 330–335.

[6] V. Fernandes, L. Mascarehnas, C. Mendonca, A. Johnson, and R. Mishra, "Speech Emotion Recognition Using Mel Frequency Cepstral Coefficient and SVM Classifier," in *2018 International Conference on System Modeling Advancement in Research Trends (SMART)*, 2018.

[7] W. Mansor, Y. K. Lee, A. I. Mohd Yassin, A. Zabidi, and R. Sahak, "Orthogonal Least Square Based Support Vector Machine for the Classification of Infant Cry with Asphyxia," in *2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 2010, pp. 986–989.

[8] Y. S. Lei and Z. Y. Wang, "The Characteristic of Infant Cries," in *National Conference on Man-Machine Speech Communication*, 2011.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Kardiyovasküler Risk Sınıflamasında Açıklanabilir ve Veri Sızıntısını Önleyen Makine Öğrenmesi Yaklaşımı

Bahadır Arabacı[a], Kemal Polat[b]*

[a]OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapay Zeka Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye.
[b]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** bahadir.arabaci@ostimteknik.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada kardiyovasküler risk sınıflaması için veri sızıntısını önleyen bir makine öğrenmesi yaklaşımı değerlendirilmiştir. Analiz CAIR CVD 2025 veri kümesinde yer alan 1529 birey ve 22 değişken üzerinden yürütülmüştür. Çalışmanın temel değerlendirme ölçütü, hastaların yüksek risk ve yüksek olmayan olarak iki risk grubuna ayrılmasıdır. Tüm ön işleme adımları yalnızca her katlamanın eğitim bölümünde öğrenilmiş ve doğrulama bölümüne uygulanmıştır. Değerlendirme 5 katlı tabakalı çapraz doğrulama ve katlama dışı olasılıklar ile yapılmıştır. Logistic Regression, Random Forest, Extra Trees Gradient, Boosting KNN ve Gaussian NB modelleri karşılaştırılmıştır. ROC AUC açısından en yüksek ortalama performans Random Forest modeli ile elde edilmiştir. Bu modelde ROC-AUC 0.8487 ve PR-AUC 0.8401 bulunmuştur. Gradient Boosting modeli ise F1 ve dengeli doğruluk açısından daha güçlü sonuçlar göstermiştir. Youden indeksine göre en uygun eşik 0.5100 olarak belirlenmiştir. Bu eşikte duyarlılık 0.7033, özgüllük 0.8215 ve F1 skoru 0.7404 bulunmuştur. Permütasyon temelli değişken önem analizinde Sigara kullanımı durumu Kardiyovasküler hastalık aile öyküsü ve Diyabet durumu en etkili değişkenler olarak öne çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Açıklanabilir yapay zeka, Çapraz doğrulama, Kardiyovasküler risk, Makine öğrenmesi, Veri sızıntısı.*

An Explainable and Leakage Resistant Machine Learning Approach for Cardiovascular Risk Classification

ABSTRACT

This study evaluated a leakage resistant machine learning framework for cardiovascular risk classification. The analysis was performed on the CAIR CVD 2025 dataset including 1529 individuals and 22 variables. The primary endpoint was binary discrimination between HIGH and NON HIGH risk groups. All preprocessing steps were learned only within the training portion of each fold and then applied to the validation portion. Model assessment was based on 5 fold stratified cross validation and out of fold probabilities. Logistic Regression Random Forest Extra Trees Gradient Boosting KNN and Gaussian NB models were compared. The highest mean ROC AUC was achieved by the Random Forest model. This model reached a ROC AUC of 0.8487 and a PR AUC of 0.8401. Gradient Boosting produced stronger F1 and balanced accuracy values. Threshold analysis identified 0.5100 as the optimal cutoff according to the Youden index. At this threshold sensitivity was 0.7033 specificity was 0.8215 and F1 score was 0.7404. In the permutation-based variable importance analysis, smoking status, family history of cardiovascular disease, and diabetes status emerged as the most influential variables.

Keywords: *Cardiovascular risk, Cross validation, Data leakage, Explainable artificial intelligence, Machine learning.*

I. GİRİŞ

Kardiyovasküler hastalıklar dünya genelinde mortalite ve morbiditenin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır [1]. Bu yüksek hastalık yükü erken tanı ve önleme odaklı yönetim stratejilerini sağlık sistemleri

açısından daha da önemli hale getirmektedir [1], [2]. Bununla birlikte klinik tahmin modellerinin yalnızca yüksek performans göstermesi yeterli değildir. Bu modellerin aynı zamanda şeffaf biçimde raporlanması yöntemsel açıdan sağlam kurulması ve yanlılık kaynakları bakımından dikkatle değerlendirilmesi gerekir [3], [4]. Güncel kılavuzlar ve yöntem makaleleri klinik tahmin modellemesinde raporlama kalitesinin uygulanabilirliğin ve adım adım yapılandırılmış geliştirme sürecinin merkezi bir gereklilik olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır [3]–[5]. Bu nedenle kardiyovasküler risk tahmini alanında geliştirilen yeni modeller yalnızca klinik ihtiyaca değil aynı zamanda güçlü metodolojik standartlara da yanıt vermelidir [1], [3]–[5].

Kardiyovasküler risk çok sayıda demografik klinik biyokimyasal ve davranışsal belirleyicinin eş zamanlı etkisi ile şekillenen karmaşık bir yapıdır. Yaş, cinsiyet, kan basınç, lipid profili, glisemik durum, sigara kullanımı, fiziksel aktivite ve aile öyküsü gibi değişkenler arasındaki ilişkiler çoğu zaman doğrusal değildir. Değişkenler arasında çoklu etkileşimler bulunur [1], [2]. Bu nedenle klasik istatistiksel risk skorları klinik uygulamada değerli olmakla birlikte her örüntüyü yeterli esneklikle temsil edemeyebilir [1]. Elektronik sağlık kayıtlarının yaygınlaşması ve daha geniş klinik veri kümelerine erişimin artması ile makine öğrenmesi yöntemleri kardiyovasküler risk kestiriminde daha karmaşık örüntüleri yakalama potansiyeli nedeniyle öne çıkmıştır [1], [2]. Ancak bu alandaki literatür yalnızca fırsatları değil aynı zamanda veri sızıntısı aşırı uyum yetersiz doğrulama ve hatalı ön işleme gibi temel tuzakları da güçlü biçimde vurgulamaktadır [2]–[5]. Sağlık verisi ile geliştirilen tahmin modellerinde performansın güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için iç doğrulama tasarımı belirleyici rol oynar. Tek bir eğitim test bölmesi uygulaması kolay bir yaklaşım olsa da örneklem yapısına duyarlıdır ve iyimser performans tahminleri üretebilir [5], [6]. Veri sızıntısını önleyen ön işleme akışı kardiyovasküler risk modellemesinde teknik bir ayrıntı değil temel bir geçerlilik koşuludur [2], [5], [6]. Klinik veri kümelerinde eksik gözlemler ve sınıf dengesizliği de tahmin performansını doğrudan etkileyen iki temel sorundur. Eksik verilerin uygunsuz biçimde ele alınması hem yanlılığı artırabilir hem de performans tahminlerinin kararlılığını azaltabilir [5], [7]. Benzer biçimde risk sınıflandırma problemlerinde sınıflar arasındaki dengesizlik tek bir performans ölçütüne dayanmanın yetersiz kalmasına neden olabilir [9]. ROC AUC yaygın kullanılan bir ayrıştırma ölçütü olsa da özellikle dengesiz veri koşullarında tamamlayıcı ölçütlerle birlikte yorumlanması daha sağlam bir değerlendirme çerçevesi sunar. Böylece modelin yalnızca ayrıştırma gücü değil pozitif sınıfa duyarlılığı karar eşiğine bağlı davranışı ve olasılık tahminlerinin genel doğruluğu da birlikte incelenebilir [9], [10]. Klinik karar desteği bağlamında model çıktılarının güvenilirliği yalnızca ayrıştırma başarısına değil kalibrasyon düzeyine de bağlıdır. İyi ayrıştıran ancak kötü kalibre edilmiş bir model benzer risk düzeyindeki bireyler için yanıltıcı olasılıklar üretebilir ve bu durum klinik kararların doğruluğunu zayıflatabilir [11], [12]. Güncel çalışmalar kalibrasyonun yalnızca teknik bir tamamlayıcı olmadığını aynı zamanda adalet yanlılık ve alt grup performansı açısından temel bir değerlendirme alanı olduğunu göstermektedir [11]–[13]. Bunun yanında modelin hangi değişken örüntülerinden beslendiğinin anlaşılması da klinik kabul açısından önemlidir. Açıklanabilir yapay zeka yaklaşımları özellikle küresel değişken önemi incelemeleri üzerinden model davranışını yorumlamaya katkı sunmaktadır [14], [15]. Bununla birlikte gerçek dünya kullanımında model performansının zaman içinde korunabilmesi için izleme yeniden eğitim ve dağılım kayması yönetimi gibi operasyonel süreçlerin de dikkate alınması gerekir [16]–[18].

Bu bağlamda bu çalışma CAIR CVD 2025 veri kümesi [8] üzerinde kardiyovasküler risk düzeyinin sınıflandırılmasına odaklanmaktadır. Çalışmanın temel amacı veri sızıntısını önleyen bir ön işleme yapısını tabakalı çapraz doğrulama yaklaşımı ile birleştirerek daha güvenilir bir performans değerlendirmesi sunmaktır [5], [6]. Bu amaç doğrultusunda tüm dönüşümler katlama içinde öğrenilmiş ve değerlendirmeler katlama dışı tahminler üzerinden yürütülmüştür. Ayrıştırma performansı ile kalibrasyon ölçütleri de raporlanmış ve sınıf dengesizliği bağlamında metriklerin birlikte yorumlanmasına önem verilmiştir [9]–[11]. Ayrıca model davranışının daha iyi anlaşılması için açıklanabilirlik bileşenleri de çalışma akışına dahil edilmiştir [14], [15]. Böylece çalışma yalnızca bir sınıflandırma performansı raporu sunmayı değil aynı zamanda klinik tahmin modellemesinde güncel raporlama ve kalite beklentileriyle uyumlu daha sağlam bir yöntemsel çerçeve ortaya koymayı hedeflemektedir [3]–[5].

II. MATERYAL METOT

A. Veri Kümesi

Bu çalışmada, kardiyovasküler risk sınıflandırması için CAIR CVD 2025 veri kümesi kullanılmıştır [8]. Toplam 1529 birey kaydı ve 22 değişken içermektedir. Kayıtlar Jamalpur Medical College Hospital, Bangladeş kaynaklıdır ve veri toplama dönemi 20 Ocak 2024 ile 1 Ocak 2025 arasını kapsamaktadır. Hedef değişken Kardiyovasküler risk düzeyi olarak tanımlanmıştır. İkili sınıflama kurgusunda sonuç değişkeni yüksek risk ve yüksek olmayan risk olarak oluşturulmuştur. Veri kümesinde yüksek risk sınıfında 728 olgu bulunmakta olup bu grup toplam örneklemin yüzde 47.61'ini oluşturmaktadır. Yüksek olmayan risk sınıfında ise 801 olgu yer almakta ve bu grup toplam örneklemin yüzde 52.39'una karşılık gelmektedir. Bu

dağılım, birincil analiz açısından görece dengeli bir sınıf yapısına işaret etmektedir. Veri kümesindeki değişkenler, klinik açıdan anlamlı birkaç ana başlık altında toplanmaktadır. Demografik değişkenler arasında Yaş ve Cinsiyet yer almaktadır. Antropometrik bileşenler ağırlık, Boy, VÜCUT KİTLE ENDEKSİ, Karın çevresi, Boy değişkenlerini içermektedir. Kan basıncı ile ilişkili alanlarda Kan basıncı, Sistolik kan basıncı, Diyastolik kan basıncı ve Kan basıncı kategorisi bulunmaktadır. Biyokimyasal belirteçler arasında Toplam kolesterol, HDL, Tahmini LDL ve Açlık kan şekeri yer almaktadır. Yaşam tarzı ve klinik öykü alanında ise sigara kullanımı durumu, Diyabet durumu, Fiziksel aktivite düzeyi ve Kardiyovasküler hastalık aile öyküsü gibi değişkenler bulunmaktadır. Veri kalitesi açısından değerlendirildiğinde, eksik veri oranlarının genel olarak düşük düzeyde olduğu görülmüş olup en yüksek eksik oranı Diyastolik kan basıncı değişkeninde gözlenmiş olup bu oran yüzde 5.36 olarak belirlenmiştir. Eksiklik düzeyinin sınırlı olması, veri ön işleme aşamasında uygulanacak atama stratejilerinin daha kontrollü biçimde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle veri kümesi hem yöntemsel güvenilirlik hem de modelleme istikrarı açısından uygun bir başlangıç zemini sunmaktadır.

B. Yöntem

Bu çalışma retrospektif ve gözlemsel bir sınıflandırma tasarımıyla yürütülmüştür. Üç farklı özellik seti değerlendirilmiştir. Birincil klinik set 15, minimal tarama seti 12 ve genişletilmiş sızıntısız set 15 değişken içermektedir. Birincil klinik ve genişletilmiş sızıntısız setler aynı değişkenleri içerdiğinden bu iki yapı için performans ölçütleri aynıdır. Doğrulama süreci sınıf oranlarını koruyan karıştırılmış 5 katlı StratifiedKFold yaklaşımıyla yürütülmüştür. Tüm analizlerde rastgele durum değeri 42 olarak sabitlenmiştir. Model değerlendirmesi katlama dışı tahmin olasılıkları üzerinden yapılmıştır. Bu katlamalı çapraz doğrulama yaklaşımı tek bir eğitim test bölmesine göre daha dengeli ve güvenilir performans tahmini sağlamaktadır. Tüm ön işleme adımları her katlamanın yalnızca eğitim bölümünde öğrenilmiş ve doğrulama bölümüne uygulanmıştır. Sayısal değişkenlerde önce medyan ile atama yapılmış ardından StandardScaler ile ölçekleme uygulanmıştır. Karşılaştırmalı analizde altı sınıflandırıcı değerlendirilmiştir. Model performansı ROC AUC, PR AUC, F1 skoru, dengeli doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve Brier skoru ile değerlendirilmiştir. Fold ortalamaları için yüzde 95 güven aralıkları t dağılımı ile hesaplanmıştır. ROC AUC için yüzde 95 bootstrap güven aralıkları ise 600 tekrar ile elde edilmiştir. Model karşılaştırmalarında birincil özellik setinde en yüksek ROC AUC değerine sahip model diğer modellerle fold bazında karşılaştırılmış, eşleştirilmiş t testi uygulanmış ve çoklu karşılaştırmalar için Holm düzeltmesi kullanılmıştır. Eşik analizi birincil analizde en iyi performansı veren modelin katlama dışı olasılıkları üzerinden yapılmıştır. Optimal karar eşiği Youden indeksi ile belirlenmiştir. Ayrıca 0.30, 0.50 ve 0.70 eşikleri de karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım modelin farklı klinik kullanım senaryolarındaki davranışını incelemeye olanak tanımaktadır. Değerlendirme sürecine kalibrasyon eğrileri ve Brier skoru da dahil edilmiştir. Model yorumlanabilirliğini desteklemek için en iyi performans gösteren modelde değişken önemleri permütasyon önemliliği yöntemiyle hesaplanmıştır. Önem ölçütü olarak ilgili değişkenin permütasyonu sonrası ROC AUC değerindeki düşüş kullanılmıştır. İkincil analizde ise çok sınıflı sonuçlar One vs Rest Logistic Regression yaklaşımıyla raporlanmıştır.

III. SONUÇLAR

Birincil özellik setinde, tablo 1'e göre ROC AUC açısından en yüksek ortalama performans Random Forest modeli ile elde edilmiştir. Bu model için beş katın ortalamasıyla ROC AUC 0.8487 ± 0.0230, PR AUC 0.8401 ± 0.0239 ve eşik 0.50 için F1 skoru 0.7390 ± 0.0431 bulunmuştur. ROC AUC için bootstrap yüzde 95 güven aralığı 0.8268 ile 0.8660 arasında hesaplanmıştır. Bununla birlikte, Gradient Boosting modeli F1 skoru, dengeli doğruluk ve Brier skoru açısından daha iyi ortalama değerler göstermiştir. Bu durum, model başarısının yalnızca ROC AUC ile değil, farklı performans ölçütleri birlikte değerlendirilerek yorumlanması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 1. Model performansı karşılaştırmaları

Model	ROC AUC	PR AUC	F1	doğruluk	Brier
Random Forest	0.8487 ± 0.0230	0.8401 ± 0.0239	0.7390 ± 0.0431	0.7573	0.1676
Gradient Boosting	0.8453 ± 0.0163	0.8298 ± 0.0253	0.7665 ± 0.0229	0.7797	0.1591
Extra Trees	0.8013 ± 0.0272	0.7848 ± 0.0279	0.7107 ± 0.0243	0.7223	0.1837
Logistic Regression	0.7974 ± 0.0298	0.7574 ± 0.0360	0.7355 ± 0.0158	0.7439	0.1850
KNN	0.7937 ± 0.0190	0.7838 ± 0.0298	0.6993 ± 0.0090	0.7019	0.1881
Gaussian NB	0.7937 ± 0.0383	0.7760 ± 0.0403	0.7153 ± 0.0410	0.7318	0.1857

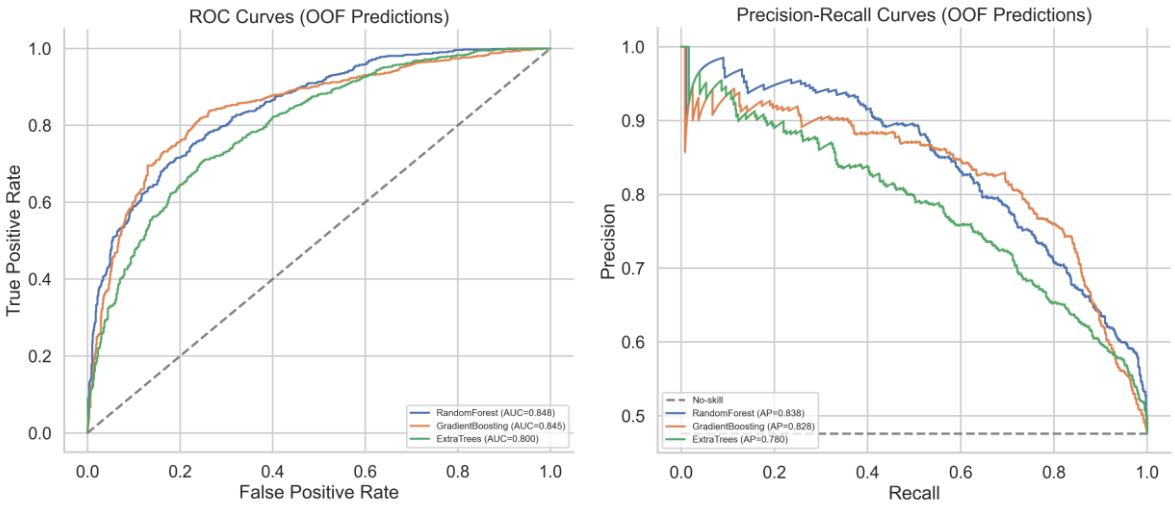
Tablo 2'de de görüleceği üzere ROC AUC lideri Random Forest olmakla birlikte, Gradient Boosting ile arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Buna karşılık, Random Forest ile Extra Trees, Logistic Regression, KNN ve Gaussian NB arasındaki farklar Holm düzeltmesi sonrasında anlamlı kalmıştır.

Bu bulgu, Random Forest ve Gradient Boosting modellerinin ikili sınıflama performansı açısından birbirine yakın olduğunu, diğer modellerin ise daha düşük ayırıcı güç sergilediğini göstermektedir.

Tablo 2. ROC AUC için eşleştirilmiş karşılaştırma sonuçları ve Holm düzeltmesi

En iyi model	Karşı model	Delta AUC	Holm p	Anlamlı 0.05
Random Forest	Gradient Boosting	0.0035	0.2703	Hayır
Random Forest	Extra Trees	0.0475	0.0009	Evet
Random Forest	Logistic Regression	0.0513	0.0004	Evet
Random Forest	KNN	0.0550	0.0041	Evet
Random Forest	Gaussian NB	0.0550	0.0023	Evet

Top 3 modelin ROC eğrileri ve PR eğrileri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Top 3 model ROC eğrileri. OOF olasılıkları ile hesaplanmıştır.

En iyi model için yapılan eşik analizinde, tablo 3'te yer aldığı üzere Youden indeksine göre optimal karar eşiği 0.5100 olarak belirlenmiştir. Bu eşikte duyarlılık 0.7033, özgüllük 0.8215, pozitif prediktif değer 0.7817, negatif prediktif değer 0.7529, F1 skoru 0.7404 ve dengeli doğruluk 0.7624 bulunmuştur. Eşik 0.30 düzeyine indirildiğinde duyarlılık belirgin biçimde artmış, ancak özgüllük azalmıştır. Buna karşılık eşik 0.70 olduğunda özgüllük yükselmiş, ancak duyarlılık belirgin biçimde düşmüştür. Bu bulgular, modelin kullanım amacına göre farklı karar eşiklerinin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Eşik analizi sonuçları. OOF olasılıkları kullanılmıştır.

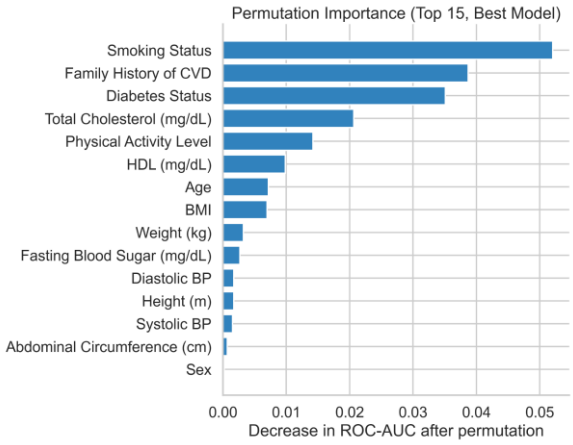
Eşik	Duyarlılık	Özgüllük	PPV	NPV	F1	doğruluk
0.30	0.9712	0.3783	0.5867	0.9352	0.7315	0.6747
0.50	0.7170	0.7978	0.7632	0.7562	0.7394	0.7574
0.5100	0.7033	0.8215	0.7817	0.7529	0.7404	0.7624
0.70	0.3558	0.9775	0.9350	0.6254	0.5154	0.6666

Permütasyon önemliliği analizinde, en yüksek katkının Sigara kullanımı durumu değişkeninde olduğu görülmüştür. Bu değişkeni Kardiyovasküler hastalık aile öyküsü ve Diyabet durumu izlemiştir. İlk 10 değişken arasında ayrıca Toplam kolesterol, Fiziksel aktivite düzeyi, HDL, Yaş, vücut kitle endeksi, Weight ve Açlık kan şekeri yer almıştır. Bu sonuçlar, modelin tahmin gücünün klinik olarak anlamlı ve beklenen risk belirteçleri üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir.

Tablo 4. Permütasyon önemliliği ile ilk 10 değişken.

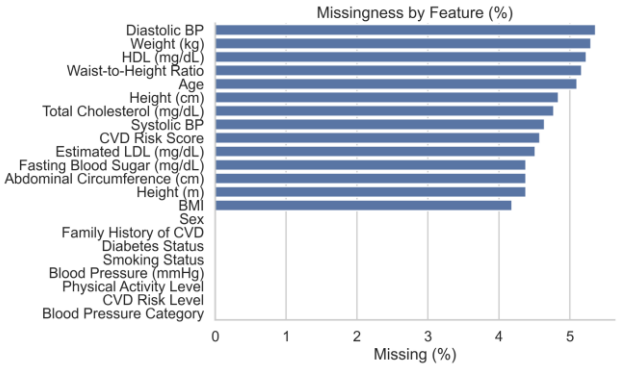
Sıra	Değişken	Önem
1	Sigara kullanımı durumu	0.0521
2	Kardiyovasküler hastalık aile öyküsü	0.0387
3	Diyabet durumu	0.0351
4	Toplam kolesterol mg dL	0.0207
5	Fiziksel aktivite düzeyi	0.0142
6	HDL mg dL	0.0098
7	Yaş	0.0072

8	Vücut kitle endeksi	0.0070
9	Ağırlık kg	0.0032
10	Açlık kan şekeri mg dL	0.0027



Şekil 2. En iyi model için permütasyon önemliliği sonuçları. İlk 15 değişken raporlanmıştır.

Şekil 3'te yer aldığı üzere Eksik veri oranları genel olarak düşük düzeydedir. En yüksek eksiklik oranı Diyastolik kan basıncı değişkeninde gözlenmiş olup bu oran yüzde 5.36 olarak hesaplanmıştır. Eksik değerler, ön işleme aşamasında katlama içi atama stratejileri ile ele alınmıştır.



Şekil 3. Değişken bazında eksik veri oranı. Yüzde değerler gösterilmiştir.

İkincil çok sınıflı analiz, One vs Rest Logistic Regression tabanı ile raporlanmıştır. Yüksek risk sınıfı için kesinlik 0.6805, duyarlılık 0.8132 ve F1 skoru 0.7409 bulunmuştur. Orta risk sınıfında F1 skoru 0.6552 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık düşük risk sınıfı için duyarlılık yalnızca 0.0364, F1 skoru ise 0.0661 düzeyinde kalmıştır. Toplam doğruluk 0.6534 bulunmuştur. Bu sonuçlar, düşük risk sınıfında belirgin bir ayrım zorluğuna işaret etmektedir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada kardiyovasküler riskin ikili sınıflandırılmasında en yüksek ortalama ROC AUC değerinin Random Forest modeli ile elde edilmesi ağaç tabanlı yöntemlerin klinik ve yaşam tarzı değişkenleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri etkili biçimde yakalayabildiğini düşündürmektedir. Bununla birlikte Gradient Boosting modelinin F1 skoru ve dengeli doğruluk açısından daha yüksek ortalama değerler göstermesi model başarısının tek bir ölçüt üzerinden yorumlanmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Random Forest ile Gradient Boosting arasında ROC AUC farkının anlamlı bulunmaması da model seçiminin yalnızca ayırıcı güce dayandırılamayacağını göstermektedir. Klinik kullanım açısından kalibrasyon karar eşiği davranışı ve yorumlanabilirlik gibi ek boyutlar da dikkate alınmalıdır [1], [2], [9]–[11].

Çalışmanın önemli katkılarından biri veri sızıntısını önleyen ön işleme akışının katlama içi olarak uygulanmış olmasıdır. Sayısal ve kategorik dönüşümlerin her katlamanın yalnızca eğitim bölümünde öğrenilmesi ve değerlendirmenin katlama dışı olasılıklar üzerinden yapılması iç geçerlilik açısından güçlü bir yaklaşım sunmaktadır. Sağlık verilerinde veri sızıntısı ve yetersiz doğrulama nedeniyle performansın olduğundan yüksek tahmin edilmesi iyi bilinen bir sorundur. Bu nedenle mevcut çalışma yalnızca

performans raporlayan bir model karşılaştırması olmaktan öte yöntemsel güvenilirliği önceleyen bir çerçeve ortaya koymaktadır.

Performansın ROC AUC ile sınırlı kalmadan dengeli doğruluk ve Brier skoru ile birlikte değerlendirilmesi de çalışmanın güçlü yönlerinden biridir. Kardiyovasküler risk sınıflaması gibi klinik problemlerde pozitif sınıf başarısının ve olasılık tahminlerinin doğruluğunun birlikte değerlendirilmesi daha dengeli bir yorum sağlar. Bu çalışmada Random Forest modelinin ROC AUC ve PR AUC açısından öne çıkması modelin hem genel ayırıcı gücünün hem de pozitif sınıf odaklı başarısının güçlü olduğunu göstermektedir. Buna karşın Gradient Boosting modelinin F1 ve dengeli doğruluk açısından daha iyi performans vermesi sınıf bazlı kararların kullanım amacına göre farklı modellerin tercih edilebileceğini düşündürmektedir [9]–[11].

Eşik analizinin sonuçları klinik karar desteği açısından ayrıca önemlidir. Youden indeksine göre optimal eşik değerinin 0.5100 olarak bulunması varsayılan 0.50 eşiğine çok yakın bir karar düzeyine işaret etmektedir. Ancak 0.30 ve 0.70 eşiklerinde duyarlılık ve özgüllük dengesinin belirgin biçimde değişmesi model çıktılarının farklı klinik senaryolarda farklı şekillerde kullanılabileceğini göstermektedir. Tarama amaçlı bir yaklaşımda daha yüksek duyarlılık tercih edilebilirken doğrulama ya da ileri inceleme önceliklendirmesinde daha yüksek özgüllük daha anlamlı olabilir. Bu nedenle modelin tek bir eşik ile sabitlenmesi yerine kullanım bağlamına göre karar düzeyinin tanımlanması daha uygun görünmektedir [9], [11], [12]. Değişken önem analizinde Sigara kullanımı durumu, Kardiyovasküler hastalık aile öyküsü ve Diyabet durumu değişkenlerinin öne çıkması klinik bilgi birikimi ile uyumlu bir örüntü sunmaktadır. Toplam kolesterol, HDL, Yaş, BM. ve Açlık kan şekeri gibi değişkenlerin de ilk sıralarda yer alması modelin kardiyometabolik risk alanındaki bilinen belirteçleri yakaladığını düşündürmektedir. Bu bulgu modelin tamamen rastlantısal ilişkiler üzerinden değil klinik olarak anlamlı örüntüler üzerinden çalıştığını desteklemektedir. Bununla birlikte permütasyon temelli önem skorlarının nedensellik göstermediği ve korelasyonlu değişkenler arasında önem paylaşımı olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle açıklanabilirlik çıktıları klinik yorumlamayı destekleyen araçlar olarak görülmeli ve nedensel sonuçlar şeklinde sunulmamalıdır [14], [15]. Eksik veri oranlarının düşük olması ve en yüksek eksikliğin yüzde 5.36 düzeyinde kalması veri kalitesi açısından olumlu bir özelliktir. Eksik değerlerin katlama içi atama ile ele alınmış olması da yöntemsel sağlamlığı artırmaktadır. Bununla birlikte eksik veri mekanizmasının ayrıntılı biçimde test edilmemiş olması bir sınırlılıktır. Eksiklik örüntüsünün rastgele olup olmadığı değerlendirilmediği için özellikle belirli alt gruplarda sistematik bilgi kaybı olasılığı dışlanamaz. İleride yapılacak çalışmalarda çoklu atama yaklaşımları ve duyarlılık analizleri ile bulguların sağlamlığı güçlendirilebilir [5], [7].

Kalibrasyon eğrilerinin sunulmuş olması ve Brier skorunun raporlanması bu çalışmanın dikkat çekici bir başka güçlü yönüdür. Klinik karar verme süreçlerinde model olasılıklarının güvenilirliği en az ayırıcı performans kadar önemlidir. Bu bağlamda Gradient Boosting modelinin daha düşük Brier skoru ile dikkat çekmesi olasılık tahminleri açısından ek bir üstünlük taşıyabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte kalibrasyon eğimi ve kalibrasyon kesişimi gibi nicel ölçütlerin raporlanmamış olması bu alanın daha da geliştirilebileceğini göstermektedir. Sonraki çalışmalarda Platt ölçekleme ya da isotonic kalibrasyon gibi yöntemlerin denenmesi klinik uygulama değerini artırabilir [12], [13]. İkincil çok sınıflı analizde düşük risk sınıfı için duyarlılığın çok düşük bulunması risk düzeylerinin ordinal yapısının mevcut yaklaşım ile tam olarak temsil edilemediğini düşündürmektedir. Yüksek risk ve INTERMEDIARY sınıflarında kabul edilebilir performans elde edilirken düşük risk sınıfındaki belirgin düşüş sınıflar arası örtüşme ve özellik uzayında yetersiz ayrışma ile ilişkili olabilir. Ayrıca One vs Rest yaklaşımı pratik bir başlangıç sağlasa da ordinal risk yapısını doğrudan modellememektedir. Bu nedenle gelecekte ordinal sınıflandırma, maliyet duyarlı öğrenme, sınıf odaklı yeniden örnekleme ve belki de hibrid karar stratejileri değerlendirilmelidir [9].

Bu çalışmanın bazı önemli sınırlılıkları vardır. Öncelikle veri kümesi tek merkez kaynaklıdır ve Bangladeş kökenli bir hastane popülasyonunu yansıtmaktadır [8]. Örneklem büyüklüğü makul olmakla birlikte modelin farklı coğrafyalarda farklı sağlık sistemlerinde ve farklı prevalans yapılarında benzer performans gösterip göstermeyeceği bilinmemektedir. Ayrıca çalışma retrospektif gözlemsel bir tasarıma sahiptir ve dış doğrulama yapılmamıştır. Bu nedenle elde edilen bulguların genellenebilirliği temkinli yorumlanmalıdır. Gerçek dünya uygulamasına geçiş öncesinde bağımsız dış kohortlarda doğrulama, alt grup performans analizi ve zaman içindeki model kaymasının değerlendirilmesi gereklidir [17], [18].

Genel olarak değerlendirildiğinde bu çalışma kardiyovasküler risk sınıflamasında yalnızca yüksek performanslı bir model seçmeyi değil aynı zamanda güvenilir bir değerlendirme çerçevesi kurmayı hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır. Bulgular ağaç tabanlı yöntemlerin bu veri yapısında güçlü performans gösterebildiğini ve veri sızıntısını önleyen çapraz doğrulama tasarımının model değerlendirmesinde önemli bir kalite güvencesi sağladığını göstermektedir. Klinik açıdan anlamlı değişkenlerin öne çıkması ve eşik analizinin farklı kullanım senaryolarına ışık tutması da çalışmanın uygulama değerini artırmaktadır. Bununla birlikte dış doğrulama, ayrıntılı kalibrasyon incelemesi ve çok sınıflı risk yapısına daha uygun modelleme stratejileri ile bu çerçevenin daha ileri taşınması gerekmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma, kardiyovasküler risk sınıflandırmasında veri sızıntısını önleyen ön işleme yaklaşımı ile tabakalı çapraz doğrulamanın birlikte kullanılmasının, yöntemsel olarak güvenilir bir değerlendirme çerçevesi sunduğunu göstermiştir. İkili sınıflandırmada Random Forest modeli ROC AUC açısından en iyi performansı gösterirken, Gradient Boosting modeli F1, dengeli doğruluk ve Brier skoru bakımından güçlü sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, model seçiminin yalnızca tek bir performans ölçütüne göre değil, ayrıştırma gücü, kalibrasyon ve klinik kullanım amacı birlikte değerlendirilerek yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sigara kullanımı, ailede kardiyovasküler hastalık öyküsü ve diyabet durumu en etkili değişkenler olarak öne çıkmıştır. Sonuç olarak, önerilen yaklaşım kardiyovasküler risk tahmini için uygulanabilir ve yorumlanabilir bir temel sunmakta, ancak klinik kullanımdan önce dış doğrulama, daha ayrıntılı kalibrasyon analizi ve çok sınıflı performansın iyileştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] D. I. Kasartzian and T. Tsiampalis. "Transforming Cardiovascular Risk Prediction A Review of Machine Learning and Artificial Intelligence Innovations." Life. vol. 15. no. 1. art. 94. 2025. doi: 10.3390/life15010094

[2] Y. Q. Cai. D. X. Gong. L. Y. Tang. Y. Cai. H. J. Li. T. C. Jing. M. Gong. W. Hu. Z. W. Zhang. X. Zhang. G. W. Zhang. "Pitfalls in Developing Machine Learning Models for Predicting Cardiovascular Diseases Challenge and Solutions." Journal of Medical Internet Research. vol. 26. e47645. 2024. doi: 10.2196/47645

[3] G. S. Collins. K. G. M. Moons. P. Dhiman. R. D. Riley. A. L. Beam. B. Van Calster. M. Ghassemi. X. Liu. J. B. Reitsma. M. van Smeden. A. L. Boulesteix. J. C. Camaradou. L. A. Celi. S. Denaxas. A. K. Denniston. B. Glocker. R. M. Golub. H. Harvey. G. Heinze. M. M. Hoffman. A. P. Kengne. E. Lam. N. Lee. E. W. Loder. L. Maier Hein. B. A. Mateen. M. D. McCradden. L. Oakden Rayner. J. Ordish. R. Parnell. S. Rose. K. Singh. L. Wynants. P. Logullo. "TRIPOD+AI statement updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods." BMJ. vol. 385. e078378. 2024. doi: 10.1136/bmj-2023-078378

[4] K. G. M. Moons. J. A. A. Damen. T. Kaul. L. Hooft. C. Andaur Navarro. P. Dhiman. A. L. Beam. B. Van Calster. L. A. Celi. S. Denaxas. A. K. Denniston. M. Ghassemi. G. Heinze. A. P. Kengne. L. Maier Hein. X. Liu. P. Logullo. M. D. McCradden. N. Liu. L. Oakden Rayner. K. Singh. D. S. Ting. L. Wynants. B. Yang. J. B. Reitsma. R. D. Riley. G. S. Collins. M. van Smeden. "PROBAST+AI an updated quality risk of bias and applicability assessment tool for prediction models using regression or artificial intelligence methods." BMJ. vol. 388. e082505. 2025. doi: 10.1136/bmj-2024-082505

[5] O. Efthimiou. M. Seo. K. Chalkou. T. Debray. M. Egger. G. Salanti. "Developing clinical prediction models a step by step guide." BMJ. vol. 386. e078276. 2024. doi: 10.1136/bmj-2023-078276

[6] D. Wilimitis and C. G. Walsh. "Practical Considerations and Applied Examples of Cross Validation for Model Development and Evaluation in Health Care Tutorial." JMIR AI. vol. 2. e49023. 2023. doi: 10.2196/49023

[7] M. Liu. S. Li. H. Yuan. M. E. H. Ong. Y. Ning. F. Xie. S. E. Saffari. Y. Shang. V. Volovici. B. Chakraborty. N. Liu. "Handling missing values in healthcare data A systematic review of deep learning based imputation techniques." Artificial Intelligence in Medicine. vol. 142. art. 102587. 2023. doi: 10.1016/j.artmed.2023.102587

[8] M. A. S. Nirob, P. Bishshash, A. K. M. F. K. Siam, M. A. Haque, and M. Assaduzzaman, "CAIR-CVD-2025: An extensive cardiovascular disease risk assessment dataset from Bangladesh," Mendeley Data, vol. 1, 2025, doi: 10.17632/d9scg7j8fp.1.

[9] J. Wainer. "An empirical evaluation of imbalanced data strategies from a practitioner's point of view." Expert Systems with Applications. vol. 256. art. 124863. 2024. doi: 10.1016/j.eswa.2024.124863

[10] E. Richardson. R. Trevizani. J. A. Greenbaum. H. Carter. M. Nielsen. B. Peters. "The receiver operating characteristic curve accurately assesses imbalanced datasets." Patterns. vol. 5. no. 6. art. 100994. 2024. doi: 10.1016/j.patter.2024.100994

[11] F. M. Ojeda. M. L. Jansen. A. Thiéry. S. Blankenberg. C. Weimar. M. Schmid. A. Ziegler. "Calibrating machine learning approaches for probability estimation A comprehensive comparison." Statistics in Medicine. vol. 42. no. 29. pp. 5451-5478. 2023. doi: 10.1002/sim.9921

[12] L. Liou. E. Scott. P. Parchure. Y. Ouyang. N. Egorova. R. Freeman. I. S. Hofer. G. N. Nadkarni. P. Timsina. A. Kia. M. A. Levin. "Assessing calibration and bias of a deployed machine learning malnutrition prediction model within a large healthcare system." npj Digital Medicine. vol. 7. art. 149. 2024. doi: 10.1038/s41746-024-01141-5

[13] M. Nikolić. D. Nikolić. M. Stefanović. S. Koprivica. D. Stefanović. "Mitigating Algorithmic Bias Through Probability Calibration A Case Study on Lead Generation Data." Mathematics. vol. 13. no. 13. art. 2183. 2025. doi: 10.3390/math13132183

[14] I. D. Mienye. G. Obaido. N. Jere. E. Mienye. K. Aruleba. I. D. Emmanuel. B. Ogbuokiri. "A survey of explainable artificial intelligence in healthcare Concepts applications and challenges." Informatics in Medicine Unlocked. vol. 51. art. 101587. 2024. doi: 10.1016/j.imu.2024.101587

[15] F. Fumagalli. M. Muschalik. E. Hüllermeier. B. Hammer. "Incremental permutation feature importance iPFI towards online explanations on data streams." Machine Learning. vol. 112. no. 12. pp. 4863-4903. 2023. doi: 10.1007/s10994-023-06385-y

[16] A. Rajagopal. S. Ayanian. A. J. Ryu. R. Qian. S. R. Legler. E. A. Peeler. M. Issa. T. J. Coons. K. Kawamoto. "Machine Learning Operations in Health Care A Scoping Review." Mayo Clinic Proceedings Digital Health. vol. 2. no. 3. pp. 421-437. 2024. doi: 10.1016/j.mcpdig.2024.06.009

[17] D. Kreuzberger. N. Kühl. S. Hirschl. "Machine Learning Operations MLOps Overview Definition and Architecture." IEEE Access. vol. 11. pp. 31866-31879. 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3262138

[18] P. Cabanillas Silva. H. Sun. M. Rezk. D. M. Roccaro Waldmeyer. J. Fliegenschmidt. N. Hulde. V. von Dossow. L. Meesseman. K. Depraetere. J. Stieg. R. Szymanowsky. F. M. Dahlweid. "Longitudinal Model Shifts of Machine Learning Based Clinical Risk Prediction Models Evaluation Study of Multiple Use Cases Across Different Hospitals." Journal of Medical Internet Research. vol. 26. e51409. 2024. doi: 10.2196/51409

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Comparison of Model Predictive Control and Time-Varying Linear Quadratic Regulator Techniques for Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots

Berkay Ocaklı[a], Hakan Yazıcı[b]*

[a]İstinye University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, İstanbul/Türkiye
[b]Yıldız Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, İstanbul/Türkiye
* **Corresponding Author:** hyazici@yildiz.edu.tr

Comparison of Model Predictive Control and Time-Varying Linear Quadratic Regulator Techniques for Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots

ABSTRACT

Reliable trajectory tracking is a fundamental requirement for autonomous wheeled mobile robots operating in real-world environments. This paper compares discrete-time Time-Varying Linear Quadratic Regulator (TV-LQR) and Model Predictive Control (MPC) for trajectory tracking of a nonholonomic differential-drive mobile robot across two reference trajectories. Both controllers are designed using the same error model and identical cost weights, ensuring that observed differences arise solely from constraint handling and prediction horizon length. Controllers are tested in a scenario where the robot starts outside the reference path. On the low-curvature L-shaped reference path with a corner turn, both controllers perform nearly identically, with a Root Mean Square (RMS) error difference of only 0.9%. On the high-curvature S-shaped trajectory with angular velocity sign reversals, however, MPC achieves 56.2% lower RMS position error and 67.3% lower Integral Absolute Error (IAE) compared to TV-LQR. This result shows that the superiority of the MPC approach becomes more pronounced as trajectory complexity increases, and that it provides a more effective solution, especially in challenging tracking scenarios involving high curvature and changes in direction.

Keywords: *Model predictive control, Nonholonomic constraints, Trajectory tracking, Wheeled mobile robot.*

I. INTRODUCTİON

Wheeled mobile robots (WMRs) are increasingly playing an important role in a wide range of applications such as factory automation, warehouse logistics, and agricultural operations. A representative class is differential-drive robots, whose kinematics are subject to a nonholonomic constraint — which means the platform cannot slide laterally and its position remains coupled to its heading. Despite their mechanical simplicity and practical versatility, control of WMRs remains challenging because of this nonholonomic structure, and the trajectory-tracking problem has been studied extensively as a result.

Over the years, trajectory tracking of mobile robots has been studied from many different control perspectives. Early work by Kanayama et al. [1] introduced the body-frame tracking error formulation which is still used in mobile robot control today. Later studies such as Fierro and Lewis [2], extended the mobile robot tracking problem from the kinematic level to the dynamic level through backstepping. More recent work, such as Villalobos-Aranda et al. [3], has continued to develop Lyapunov-based feedback laws that provide almost-global exponential convergence for differential-drive wheeled mobile robots. Although these methods are effective in many scenarios, they generally do not take actuator constraints into account during the design stage.

Model Predictive Control (MPC) provides a framework for dealing with input constraints, since it incorporates them directly into the optimization problem solved at each sampling time [4]. In the context of WMR trajectory tracking, Kühne et al. [5] proposed a linear MPC formulation based on successive linearization of the body-frame error model around the reference trajectory, which reduces the receding-

horizon problem to a quadratic program (QP). This linearization-based approach has been widely adopted for WMR trajectory tracking, as surveyed by Nascimento et al. [6], and more general MPC formulations for autonomous ground vehicles are reviewed in [7]. More recently, Klančar and Škrjanc [8] compared a linear MPC with a time-varying state-feedback tracking controller on a real mobile robot and showed that the MPC approach provides competitive real-time performance, with improved tracking especially during the initial error response. Recent experimental studies have also demonstrated real-time MPC-based trajectory tracking on differential-drive platforms under challenging and perturbed conditions [9].

On the other hand, the Time-Varying Linear Quadratic Regulator (TV-LQR) provides a good baseline for comparison. The feedback gain is computed offline by solving the discrete algebraic Riccati equation (DARE) independently at each frozen operating point along the reference trajectory [10]. This yields a gain-scheduled implementation, consistent with the general LPV/gain-scheduling viewpoint [11], so the online computational cost reduces to a single matrix–vector multiplication per sample. Since both MPC and TV-LQR minimize a quadratic cost on tracking error and input deviation, they share the same cost structure in the unconstrained case, and differ only in the prediction horizon and the choice of terminal term[10]. The main difference in practice is that the TV-LQR design is unconstrained by construction: actuator limits are enforced only through post-hoc saturation, which breaks the optimality of the DARE solution and may compromise stability when saturation occurs repeatedly [10][4].

Although several studies have compared MPC with classical feedback controllers, to the best of the authors' knowledge a fair comparison that isolates the effect of constraint handling and prediction horizon from other design factors is still missing in the WMR trajectory-tracking literature. In[8], the baseline controller was a time-varying state-feedback controller rather than an LQR-optimal gain, and the two controllers did not share a common cost functional. Similar comparisons have been reported for vehicle and aerial platforms, but typically with different dynamics, different weighting matrices and different sampling times on each side, which makes it difficult to attribute the observed differences to a single design factor. Motivated by this gap, in this paper a linear MPC and a gain-scheduled TV-LQR are designed from the same discrete linear time-varying (LTV) body-frame error model, with identical Q and R weighting matrices and identical sampling time. In this way, the only structural differences between the two controllers are the prediction horizon and the way the actuator bounds are enforced. The controllers are evaluated on two reference trajectories chosen to represent different curvature characteristics: an L-shaped path with a single 90° corner, and an S-shaped trajectory with continuous angular velocity sign changes. The comparison is based on four performance metrics: RMS position error, integral absolute error (IAE), saturation ratio and control energy. The results show that the two controllers perform almost identically on the L-shaped path (0.9 % RMS difference), while on the S-shaped trajectory the MPC reduces the RMS error by 56.2 % and the IAE by 67.3 % compared to TV-LQR.

II. Modelling the Kinematics of WMRs

The robot's pose is defined as a state vector in the global frame $x = [x, y, \theta]^T \in \mathbb{R}^3$, where x, y denote the Cartesian position and θ the heading angle. Control inputs are the linear velocity v and the angular velocity ω, so that $u = [v, \omega]^T \in \mathbb{R}^2$. The continuous-time kinematic model of the robot in the state space can be expressed as

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{1}$$

A. Reference Trajectory and Virtual Robot

In the trajectory tracking problem of nonholonomic wheeled mobile robots, it is standard to describe the desired motion by means of a virtual or reference robot that evolves according to the same kinematic constraints as the actual robot [1]. Instead of using only a geometric curve in the Cartesian plane, the desired motion is defined through the time-varying reference linear and angular velocities, $v_r(t)$ and $\omega_r(t)$, which drive the virtual robot according to the same kinematic model (1), here evaluated at the reference pose:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & 0 \\ \sin\theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \tag{2}$$

Integrating (2) from a given initial pose yields the reference trajectory $x_r(t) = [x_r, y_r, \theta_r]^T$, where x_r, y_r and θ_r denote the reference position and heading angle, respectively. Because the virtual robot follows the same nonholonomic model as the physical platform, the reference heading remains tangent to the path and the pair of reference inputs is kinematically consistent. These inputs also act as a feed-forward term in both

controllers, so that the feedback component only has to compensate deviations from the reference rather than reproduce the entire motion from rest.

B. Body-Frame Error Dynamics

Following the Kanayama formulation [1], the pose error is expressed in the body frame of the robot with respect to the virtual robot as:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

Time differentiation of (3) and substitution of (1) yield the continuous-time error dynamics

$$\begin{aligned} \dot{e_x} &= \omega\, e_y - v + v_r \cos e_\theta\,, \\ \dot{e_y} &= -\omega\, e_x + v_r \sin e_\theta\,, \\ \dot{e_\theta} &= \omega_r - \omega. \end{aligned} \tag{4}$$

Linearization around the working point $e \approx 0$ and Euler discretization with sampling time T_s produce the discrete linear time-varying (LTV) model

$$e(k+1) = A(k)\, e(k) + B\, \delta(k) \tag{5}$$

where $\delta(k) = u(k) - u_r(k)$ is the input deviation from the feed-forward reference, $e(k) = [e_1, e_2, e_3]^{\mathrm{T}}$ collects the three body-frame error components (e_x, e_y, e_θ), and the system matrices are

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & -T_s\omega_r & 0 \\ T_s\omega_r & 1 & T_s v_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$B = \begin{bmatrix} T_s & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix} \tag{7}$$

Parameter variation enters from $v_r(k)$ and $\omega_r(k)$, which makes the prediction model in (5) a discrete-time LTV model system with a constant input matrix B. Both controllers used in this study are designed from this same LTV model.

III. CONTROLLER DESİGN

This section presents the design of the two trajectory-tracking controllers compared in this study. Both controllers are derived from the same discrete-time linear time-varying tracking error model obtained by linearizing the body-frame error dynamics along the reference trajectory.

The first controller is a time-varying LQR implemented in a gain-scheduled form. It provides a computationally efficient baseline, since the feedback gains are computed offline and the online control action is obtained by a simple matrix–vector multiplication. However, this controller is unconstrained by construction, and actuator limits can only be imposed after the control law is computed. The second controller is a linear MPC formulation, in which the same tracking model and quadratic cost structure are used, but the actuator constraints are included directly in the finite-horizon optimization problem. In this way, the comparison focuses on the effect of predictive optimization and explicit constraint handling on the trajectory-tracking performance.

A. Time-Varying LQR

The TV-LQR controller is implemented as a gain-scheduled scheme based on the frozen-parameter discrete algebraic Riccati equation (DARE). For each sampling instant $k = 1, \ldots, N$ along the reference trajectory, the prediction matrix $A(k)$ in (6) is evaluated at the corresponding reference inputs $v_r(k)$ and $\omega_r(k)$, and the DARE

$$P(k) = Q + A(k)^{\mathrm{T}} P(k) A(k) - A(k)^{\mathrm{T}} P(k) B \left[R + B^{\mathrm{T}} P(k) B\right]^{-1} B^{\mathrm{T}} P(k) A(k) \tag{8}$$

is solved offline with $A(k)$ and B treated as constant. The corresponding feedback gain

$$K(k) = \left[R + B^{\mathrm{T}} P(k) B\right]^{-1} B^{\mathrm{T}} P(k) A(k) \tag{9}$$

is computed once and stored in a lookup table prior to the simulation loop. At each sampling instant the online control law reduces to a single matrix–vector product,

$$u(k) = u_r(k) - K(k)\, e(k) \tag{10}$$

followed by input saturation sat($u(k)$, u_{min}, u_{max}) to enforce the actuator limits.

B. Model Predictive Control

At each sampling instant, the MPC formulation minimizes a finite-horizon quadratic cost subject to the prediction model and input constraints:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \left[e(k)^{\mathrm{T}} Q\, e(k) + \left(u(k) - u_r(k)\right)^{\mathrm{T}} R \left(u(k) - u_r(k)\right) \right] + e(N)^{\mathrm{T}} P\, e(N) \tag{11}$$

subject to

$$e(k+1) = A(k)\, e(k) + B\left(u(k) - u_r(k)\right) \tag{12}$$

$$u_{\min} \le u(k) \le u_{\max} \tag{13}$$

Here Q and R are the same stage-cost weights used by the TV-LQR, and N is the prediction horizon. The terminal weight P is chosen as the solution of the discrete algebraic Riccati equation (8) evaluated at the final reference operating point of the horizon, so that the terminal cost approximates the infinite-horizon cost-to-go and the truncated finite-horizon problem inherits the stabilizing behaviour of the underlying LQR design. This choice also keeps the MPC and TV-LQR cost functionals identical in the unconstrained case, isolating the effect of explicit constraint handling.

In the MPC formulation, only the actuator limits are applied as constraints on the absolute control inputs $u(k) = [v(k), \omega(k)]^{\mathrm{T}}$. For the WMR, the bounds used are [12]

$$-0.22 \le v(k) \le 0.22 \text{ m/s}, \quad -2.84 \le \omega(k) \le 2.84 \text{ rad/s} \tag{14}$$

which are applied over all prediction steps $k = 0, \ldots, N-1$. These constraints are embedded into the QP solved at each sampling instant.

IV. Simulation Results

This section presents the simulation study used to compare the two controllers under identical conditions. The simulation environment and the four performance metrics are introduced first, after which the closed-loop tracking behaviour of the MPC and the TV-LQR is examined on the two reference trajectories. The L-shaped path is used to assess performance under brief, transient saturation, while the S-shaped reference probes the controllers when the actuators remain saturated for a sustained portion of the motion.

A. Simulation Setup

Both controllers are evaluated under identical conditions on a simulated TurtleBot3 Burger model with sampling time $T_s = 0.1$ s, prediction horizon $N = 20$, and shared cost weights $Q = \mathrm{diag}(120, 110, 20)$ and $R = \mathrm{diag}(0.5, 0.5)$. The actuator bounds correspond to the TurtleBot3 datasheet limits [12] ($v_{max} = \pm 0.22$ m/s, $\omega_{max} = \pm 2.84$ rad/s). Both controllers are initialized at the same offset, $(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta) = (-0.2 \text{ m}, +0.5 \text{ m}, 0 \text{ rad})$. Two reference trajectories are used: an L-shaped path with a single 90° corner, and an S-shaped reference with continuous angular-velocity sign changes.

Controllers are compared using four metrics evaluated over the simulation steps. The root mean square (RMS) position error is defined as

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(e_{x,k}^2 + e_{y,k}^2\right)} \tag{15}$$

where $e_{x,k}$ and $e_{y,k}$ denote the Cartesian tracking-error components at the k-th sampling instant. The integral absolute error is computed as

$$\mathrm{IAE} = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{e_{x,k}^2 + e_{y,k}^2}\; T_s \tag{16}$$

The set of samples at which an actuator command is close to its admissible limit is defined by

$$\mathcal{S} = \{k \in \{1, \ldots, N\}:\ |v_k| \ge 0.99 v_{\max} \text{ or } |\omega_k| \ge 0.99 \omega_{\max}\} \tag{17}$$

Using this set, the saturation ratio is calculated as

$$\mathrm{SR} = \frac{100}{N}|\mathcal{S}|\ [\%] \tag{18}$$

Finally, the control effort index is given by

$$J_u = \sum_{k=1}^{N} (v_k^2 + \omega_k^2)\, T_s \tag{19}$$

B. Tracking Performance

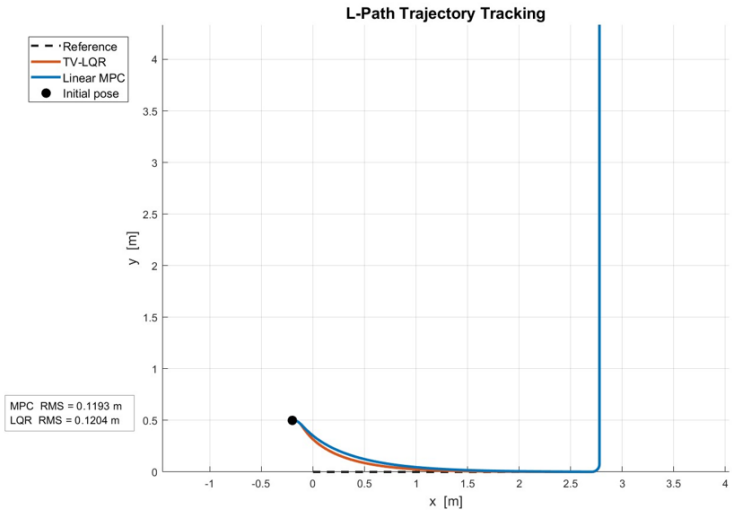


Figure 1. Closed-loop tracking on the L-shaped reference.

Figure 1 shows the closed-loop trajectories on the L-shaped reference. Both controllers converge smoothly to the path and take the corner without overshoot, producing visually identical behaviour. The RMS position error is 0.1193 m for the MPC and 0.1204 m for the TV-LQR, with a relative difference of only −0.9%, and similar differences are observed in the other metrics. Both TV-LQR and MPC exhibit comparable actuator saturation levels, with the saturation ratio remaining approximately 20% for both controllers. When the constraints are not repeatedly active, the constrained MPC and the unconstrained TV-LQR show similar tracking performance.

A different picture emerges on the S-shaped reference trajectory, where angular-velocity sign reversals stress the actuators throughout the simulation. Figure 2 shows that the MPC tracks the reference closely, while the TV-LQR performs a long, oscillatory tracking. As shown in Figure 3, the TV-LQR linear-velocity command remains saturated during most of the convergence phase, while the angular-velocity command stays within the allowable range. Since TV-LQR has no explicit constraint-handling mechanism, its computed velocity command is post-hoc clamped whenever it exceeds the admissible actuator limits. On the other hand, MPC explicitly handles the input constraints within the optimization problem and generates smoother admissible commands. The performance gap is large in every metric: the MPC reduces the RMS position error by 56.2% (0.1368 m vs. 0.3120 m), the IAE by 67.3% (2.2647 vs. 6.9239 m·s), the saturation ratio by 40.6% (23.69% vs. 39.90%), and the control energy by 43.0%.

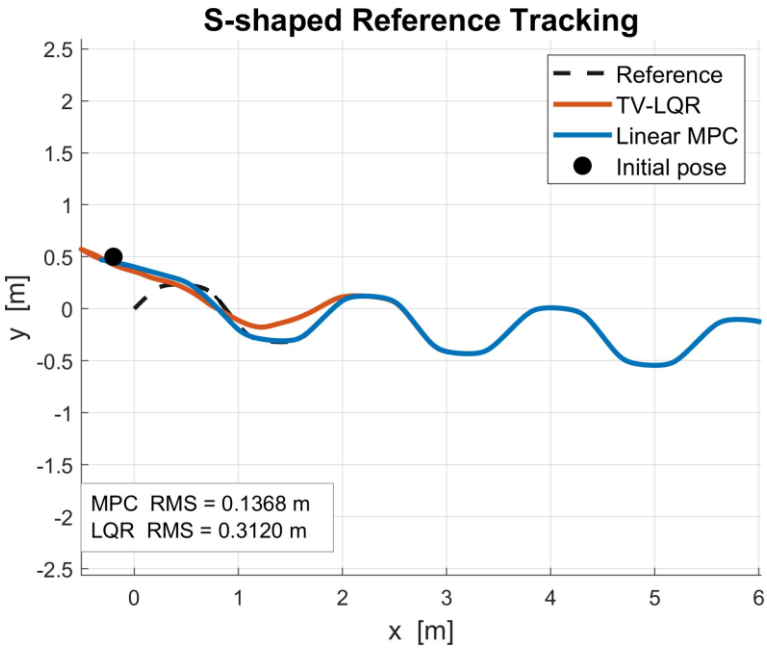


Figure 2. Closed-loop tracking on the S-shaped reference with continuous curvature changes.

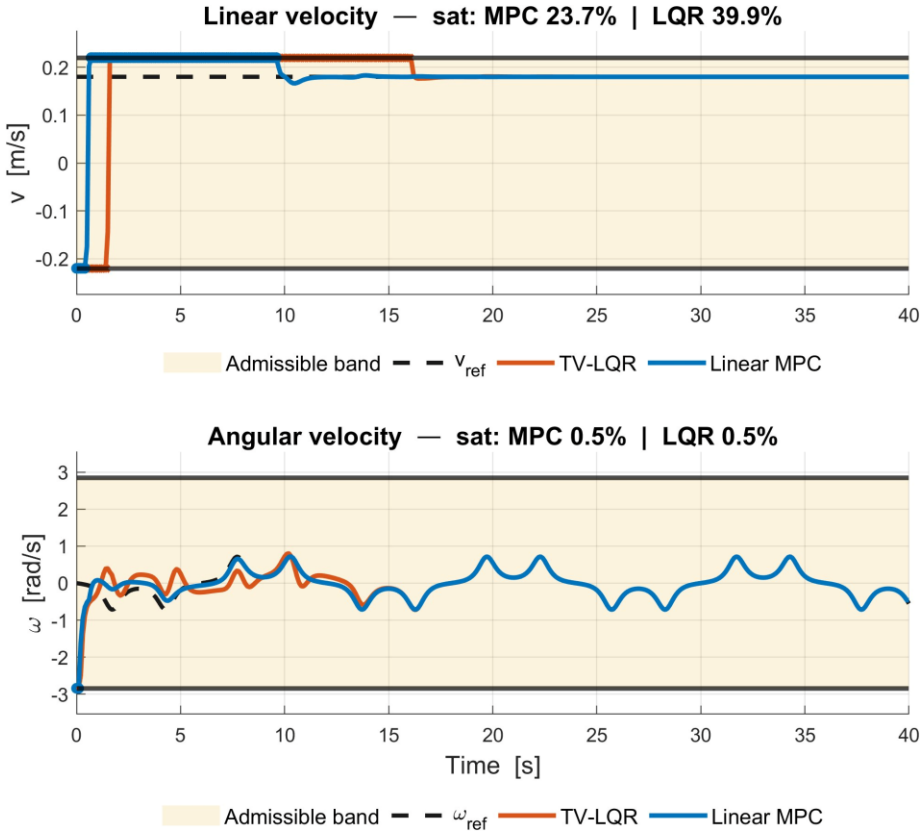


Figure 3. Control signals on the S-shaped reference.

Table 1. Performance comparison between Linear MPC and TV-LQR for L-path and S-shaped reference trajectories. (Bold values indicate the better performance for each metric.)

Metric	L-Path Reference			S-Shaped Reference		
	MPC	**TV-LQR**	**Δ**	**MPC**	**TV-LQR**	**Δ**
RMS pos. error [m]	**0.1193**	0.1204	−0.9%	**0.1368**	0.3120	−56.2%
IAE pos. error [m·s]	**1.8182**	1.8498	−1.7%	**2.2647**	6.9239	−67.3%
Saturation [%]	**19.70**	21.20	−7.1%	**23.69**	39.90	−40.6%
Control energy [m^2/s]	**2.0097**	2.5282	−20.5%	**2.5318**	4.4428	−43.0%

The performance metrics in Table 1 indicate that MPC outperforms TV-LQR on both trajectories. However, the improvement becomes more evident when the actuator constraints are frequently active. The lower saturation ratio of MPC is mainly due to its constraint-handling capability. Since TV-LQR does not explicitly handle input constraints, its computed control input may exceed the admissible actuator limits and is then post-hoc clamped in the simulation.

V. Discussion

The results show that the advantage of MPC over TV-LQR is not constant but scales with the level of actuator saturation along the trajectory. On the L-shaped path, where the actuator constraints are reached only briefly during the initial transient, the two controllers produce statistically indistinguishable performance, with an RMS position error difference of only 0.9%. On the S-shaped reference, where angular-velocity reversals push the actuators into saturation throughout the run, the MPC reduces the RMS position error by 56.2% and the integral absolute error by 67.3% compared to the TV-LQR. The saturation ratio is identified as the primary explanatory variable for the performance gap, providing a quantitative criterion for when the additional computational cost of MPC is justified in practice. In the present study the two controllers were practically equivalent at a saturation ratio near 20%, whereas the gap widened sharply once the saturation ratio approached 40%; as a practical guideline, this suggests that the predictive controller is worth its computational overhead mainly when the actuators are expected to operate near their limits for a sustained fraction of the trajectory.

VI. Conclusion

This paper presented a fair comparison between Linear Model Predictive Control and a gain-scheduled Time-Varying Linear Quadratic Regulator for trajectory tracking of a nonholonomic differential-drive mobile robot. Both controllers were derived from the same discrete linear time-varying body-frame error model and used identical cost weights and sampling rate, so that the only structural differences between them were the prediction horizon and the way the actuator bounds were enforced. The two controllers were tested on an L-shaped reference path and on an S-shaped reference with continuous angular-velocity sign changes, and the predictive controller showed a clear advantage under high-saturation conditions. Future work will focus on experimental validation on a physical TurtleBot3 platform and on extending the comparison to scenarios with sensor noise, model uncertainty, and wheel slip.

References

[1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Cincinnati, OH, USA, 1990, pp. 384–389.

[2] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics," *J. Robot. Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 149–163, 1997.

[3] C. Villalobos-Aranda, J. Pliego-Jiménez, C. Montañez-Molina, and A. Arellano-Delgado, "An almost global trajectory tracking controller for differential-drive wheeled mobile robots," Int. J. Control Autom. Syst., vol. 22, no. 12, pp. 3684–3693, Dec. 2024, doi: 10.1007/s12555-024-0218-4.

[4] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, and M. Diehl, *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*, 2nd ed. Madison, WI: Nob Hill Publishing, 2017.

[5] F. Kühne, W. F. Lages, and J. M. G. da Silva Jr., "Model predictive control of a mobile robot using linearization," in *Proc. Mechatronics and Robotics (MechRob)*, Aachen, Germany, 2004, pp. 525–530.

[6] T. P. Nascimento, C. E. T. Dórea, and L. M. G. Gonçalves, "Nonholonomic mobile robots' trajectory tracking model predictive control: a survey," *Robotica*, vol. 36, no. 5, pp. 676–696, May 2018, doi: 10.1017/S0263574717000637.

[7] S. Yu, M. Hirche, Y. Huang, H. Chen, and F. Allgöwer, "Model predictive control for autonomous ground vehicles: a review," Auton. Intell. Syst., vol. 1, Art. no. 4, Aug. 2021, doi: 10.1007/s43684-021-00005-z.

[8] G. Klančar and I. Škrjanc, "Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time," Robot. Auton. Syst., vol. 55, no. 6, pp. 460–469, 2007, doi: 10.1016/j.robot.2007.01.002.

[9] D. Guffanti et al., "Robust model predictive control with a dynamic look-ahead re-entry strategy for trajectory tracking of differential-drive robots," *Sensors*, vol. 26, no. 2, art. 520, Jan. 2026, doi: 10.3390/s26020520.
[10] F. L. Lewis, D. Vrabie, and V. L. Syrmos, *Optimal Control*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
[11] C. Hoffmann and H. Werner, "A survey of linear parameter-varying control applications validated by experiments or high-fidelity simulations," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 23, no. 2, pp. 416–433, Mar. 2015, doi: 10.1109/TCST.2014.2327584.
[12] ROBOTIS, "TurtleBot3 e-Manual: Specifications," ROBOTIS Co., Ltd. [Online]. Available: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/specifications/. [Accessed: May 12, 2026].

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

5G Uyumlu 4.8 GHz Mikroşerit Yama Anten Tasarımı, Üretimi ve Radyasyon Örüntüsünün Karakterizasyonu

Mehmet Duman, Beyza Yılmaz, Furkan Yıldız*

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** mehmetduman@duzce.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, 5G kablosuz haberleşme uygulamaları için 4.8 GHz merkez frekansında çalışan bir mikroşerit yama anten tasarlanmış, üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Anten, göreli dielektrik geçirgenliği 4.3 olan FR4 substrat üzerine gerçekleştirilmiştir. Ölçülen S11 parametresi 4.760 GHz'de -40.47 dB minimum değerine ulaşmış, hedef frekans olan 4.8 GHz'de ise -18.63 dB olarak ölçülmüştür. -10 dB kriteri esas alındığında empedans bant genişliği 4.516 GHz ile 4.832 GHz arasında yaklaşık 316 MHz olarak belirlenmiştir. Farklı frekanslarda gerçekleştirilen radyasyon örüntüsü ölçümleri, en iyi yönlü karakteristiğin tasarım frekansı olan 4.8 GHz'de elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu frekansta 1° yönünde 19.638 dB maksimum kazanç, 30° yarı güç hüzme genişliği (HPBW) ve 86° ilk sıfır hüzme genişliği (FNBW) elde edilmiştir. Sonuçlar, tasarlanan antenin yönlü radyasyon gerektiren 5G baz istasyonu ve nokta-nokta haberleşme uygulamaları için uygun bir aday olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Dar hüzme ışıması, FR4 tabanlı mikroşerit anten, Radyasyon örüntüsü karakterizasyonu, 5G yönlü anten.*

Design, Fabrication, and Characterization of the Radiation Pattern of a 5G-Compatible 4.8 GHz Microstrip Patch Antenna

ABSTRACT

This study presents the design, fabrication, and characterization of a microstrip patch antenna operating at 4.8 GHz for 5G wireless communication applications. The antenna was implemented on an FR4 substrate with a relative permittivity of 4.3. The measured S11 parameter showed a minimum of -40.47 dB at 4.760 GHz, with a value of -18.63 dB at the target frequency of 4.8 GHz, yielding an impedance bandwidth of approximately 316 MHz (-10 dB criterion) spanning from 4.516 GHz to 4.832 GHz. The radiation pattern measurements, conducted at multiple frequencies, demonstrated that the most favorable directional characteristics were obtained at the design frequency of 4.8 GHz, with a maximum gain of 19.638 dB at 1°, a half-power beamwidth (HPBW) of 30°, and a first-null beamwidth (FNBW) of 86°. The results demonstrate that the proposed antenna is a suitable candidate for 5G base station and point-to-point communication applications requiring directional radiation.

Keywords: *FR4-based microstrip antenna, Narrow beamwidth radiation, Radiation pattern characterization, 5G directional antenna.*

I. GİRİŞ

Beşinci nesil (5G) kablosuz haberleşme sistemleri, yüksek veri hızı, düşük gecikme süresi ve geniş cihaz bağlantısı gereksinimleriyle birlikte anten tasarımı alanında yeni talepler doğurmuştur [1]. 4800–4990 MHz bandı, IMT (Uluslararası Mobil Telekomünikasyon) için tanımlanmış olup bu band, pek çok ülkede 5G altyapısı için öncelikli frekans aralıkları arasında yer almaktadır. Bu çerçevede 4.8 GHz, başta Çin ve Japonya olmak üzere pek çok ülkede 5G dağıtımı için tahsis edilmiş stratejik bir frekanstır [2].

Mikroşerit yama antenler; düşük profil yapıları, hafif tasarımları, düşük üretim maliyetleri ve entegre devre sistemleriyle uyumlulukları nedeniyle 5G uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir [3],

[4]. Bununla birlikte, mikroşerit antenlerin radyasyon verimi ve kazanç sınırları, substrat malzemesi ve geometrik parametrelerle doğrudan ilişkilidir [5]. FR4 gibi yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip ve düşük maliyetli substratlar, özellikle prototip üretim aşamasında sıkça kullanılmakta; ancak kayıp tanjantı nedeniyle anten verimi belirli ölçüde sınırlandırılmaktadır [6].

5G sub-6 GHz bandında anten tasarımı üzerine literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Li vd. [7], 5G baz istasyonu uygulamaları için diferansiyel beslemeli çift bantlı çift polarizasyonlu bir filtreleme anteni tasarlamış ve yüksek seçicilik elde etmiştir. Liu vd. [8], 5G sub-6 GHz baz istasyonu için geniş bantlı çift polarizasyonlu bir anten önermiş ve üstün yönlülük karakteristikleri raporlamıştır. Pandey vd. [9] ise 5G ve IoT uygulamaları için FR4 tabanlı ultra-geniş bantlı mikroşerit anten tasarlamış ve geniş empedans bant genişliği elde etmiştir. Tiang vd. [10], B5G milimetre dalga uygulamaları için yeni bir mikroşerit yama anten mimarisi önermiştir. Gao vd. [11], kompakt mikroşerit yama anten tasarımında geometrik optimizasyon yöntemlerini incelemiştir.

Radyasyon örüntüsü karakterizasyonu, anten performansının değerlendirilmesinde temel ölçütlerden birini oluşturmaktadır. Yarı güç hüzme genişliği (HPBW) ve ilk sıfır hüzme genişliği (FNBW) gibi parametreler, antenin yönlülük özelliklerini doğrudan tanımlamaktadır [4]. Literatürde S11 parametresinin minimum olduğu frekans ile en iyi radyasyon örüntüsünün elde edildiği frekansın her zaman örtüşmediği bilinmekte olup bu durum, substrat kayıpları ve besleme hattı geometrisine bağlı rezonans karakteristikleriyle açıklanmaktadır [5], [6], [12].

Bu çalışmada, 4.8 GHz merkez frekansında çalışmak üzere tasarlanan FR4 tabanlı mikroşerit yama antenin tasarım süreci, üretimi ve ölçüm sonuçları sunulmaktadır. S11 parametresi ve radyasyon örüntüsü ölçümleri gerçekleştirilmiş; farklı frekanslarda elde edilen örüntüler karşılaştırılarak en iyi yönlü karakteristiğin tasarım frekansı olan 4.8 GHz'de elde edildiği gösterilmiştir. Çalışmanın geri kalanında sırasıyla anten tasarım parametreleri, yöntem ve kullanılan malzeme (Bölüm 2), ölçüm sonuçları (Bölüm 3), tartışma (Bölüm 4) ve sonuç (Bölüm 5) yer almaktadır.

II. YÖNTEM VE MALZEME

Bu bölümde, 4.8 GHz merkez frekansında çalışmak üzere tasarlanan FR4 tabanlı 4×4 altıgen yama dizi antenin tasarım parametreleri, üretim süreci ve ölçüm düzeneği ele alınmaktadır. Anten geometrisi, substrat özellikleri, besleme ağı yapısı ve kullanılan ölçüm ekipmanları sırasıyla açıklanmaktadır.

A. Anten Tasarımı ve Besleme Ağı

Bu çalışmada, 4.8 GHz merkez frekansı için altıgen yama elemanlardan oluşan 4×4 dizi mikroşerit anten tasarlanmıştır. Anten, göreli dielektrik geçirgenliği $\varepsilon_r = 4.3$, kalınlığı $h = 1.6$ mm ve kayıp tanjantı $\tan \delta = 0.025$ olan FR4 substrat üzerine gerçekleştirilmiştir. İletken katman olarak hem üst hem de alt yüzeyde 35 μm kalınlığında bakır tabaka kullanılmıştır [3], [4].

Tasarımda standart dikdörtgen yama geometrisi yerine altıgen yama elemanlar tercih edilmiştir. Altıgen geometri, komşu elemanlar arasındaki elektromanyetik kuplajı azaltırken dizi içindeki eleman yoğunluğunu artırma avantajı sunmaktadır [1]. Her bir altıgen elemanın kenar uzunluğu 10 mm, elemanlar arası bağlantı boşluğu 0.68 mm olarak belirlenmiştir. Dizi anten, T-bağlantıları aracılığıyla gücü 16 elemana eşit olarak dağıtan korporatif besleme ağı (corporate feed network) ile beslenmiştir. Antenin tasarımı, besleme ağının geometrisi ve yankısız odadaki ölçüm anı Şekil 1'de verilmektedir. SMA konnektör bağlantı noktasındaki besleme hattı genişliği 3.14 mm olup anten, 50 Ω empedans uyumu sağlanarak beslenmiştir.

B. Üretim

Anten, FR4 substrat üzerine standart fotolitografi ve kimyasal aşındırma yöntemleriyle üretilmiştir. Üretilen antenin toplam boyutu, besleme ağı dahil olmak üzere yaklaşık 120 mm × 100 mm'dir. SMA konnektör, FR4 üzerine üretilen antenin besleme kısmına lehimlenerek sabitlenmiştir.

C. Ölçüm Düzeneği

Antenin S11 parametresi, Libre Vektör Ağ Analizörü kullanılarak açık alanda ölçülmüştür. Ölçümler 3–6 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

Radyasyon örüntüsü ölçümleri ise yankısız oda (anechoic chamber) ortamında, Rohde & Schwarz ZVB20 VNA ile azimuth ve elevation eksenlerinde hareket edebilen otomatik anten konumlandırma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örüntü ölçümleri 4.8 GHz merkez frekansında yapılmış; HPBW ve FNBW değerleri elde edilen polar koordinat verileri üzerinden hesaplanmıştır [12].



Şekil 1. Antenin tasarımı, besleme ağının geometrisi ve yankısız odadaki ölçüm anı

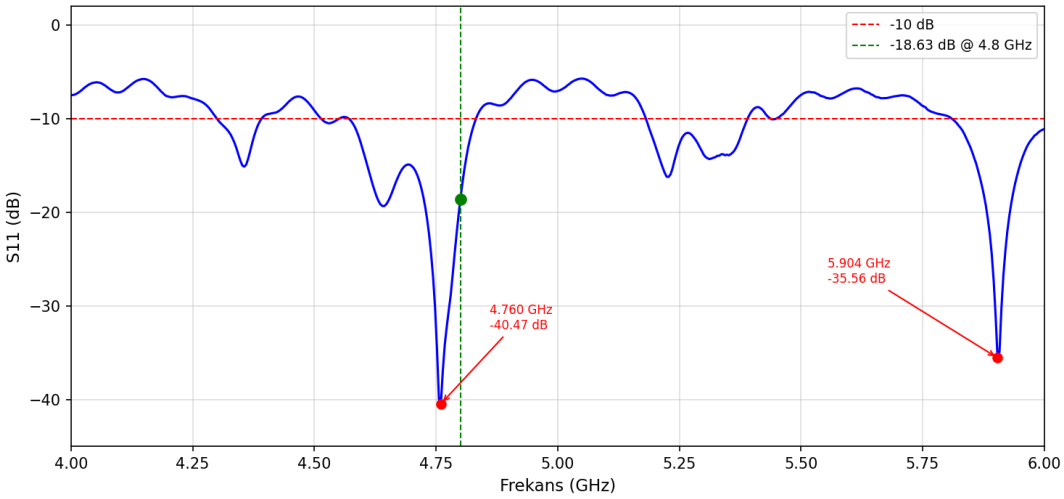
III. BULGULAR

Bu çalışmada; üretilen 4×4 altıgen yama dizi antenin elektriksel performansı, S11 parametresi ve radyasyon örüntüsü ölçümleri aracılığıyla deneysel olarak karakterize edilmiştir. Ölçümler, antenin 4.8 GHz merkez frekansında empedans uyumu ve belirgin yönlü ışıma özelliği sergilediğini ortaya koymaktadır. Her iki ölçüm grubuna ait bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

A. Yansıma Parametresi

Üretilen antenin S11 frekans karakteristiği, Libre Vektör Ağ Analizörü kullanılarak 3–6 GHz aralığında ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2'de sunulmuştur. Ölçüm sonuçları, antenin 4.760 GHz'de −40.47 dB minimum yansıma katsayısına ulaştığını ortaya koymaktadır. Hedef tasarım frekansı olan 4.8 GHz'de ise S11 değeri −18.63 dB olarak ölçülmüştür. −10 dB eşik değeri esas alındığında empedans bant genişliğinin 4.516 GHz ile 4.832 GHz arasında, yaklaşık 316 MHz'e karşılık geldiği belirlenmiştir.

Çalışmada merkez frekans olarak S11 minimumunun gözlemlendiği 4.760 GHz yerine 4.8 GHz'nin tercih edilmesinin temel gerekçesi, S11 parametresinin tek başına anten performansını belirleyen bir kriter olmadığıdır. S11 minimumu, antenin besleme noktasındaki empedans uyumunun en iyi sağlandığı frekansı göstermektedir; ancak bu frekans, radyasyon örüntüsünün en kararlı ve yönlü olduğu frekansla her zaman örtüşmemektedir. Bunun başlıca nedeni, substrat kayıpları, besleme hattı geometrisi ve dizi elemanları arasındaki elektromanyetik kuplaj etkilerinin farklı frekanslarda farklı biçimlerde tezahür etmesidir. Bu etkenler, S11 minimumunun gözlemlendiği frekansta anten akımı dağılımının bozulmasına ve dolayısıyla yan lob seviyelerinin artmasına ya da ana lobun şeklinin bozulmasına yol açabilmektedir. Nitekim gerçekleştirilen radyasyon örüntüsü ölçümleri, en dar hüzme genişliği ve en yüksek yön kazancının 4.8 GHz'de elde edildiğini göstermiştir. Bu nedenle 4.8 GHz, hem IMT frekans tahsisi açısından hedef band ile örtüşmesi hem de radyasyon performansının en elverişli düzeyde sergilendiği frekans olması bakımından tasarım merkez frekansı olarak belirlenmiştir.

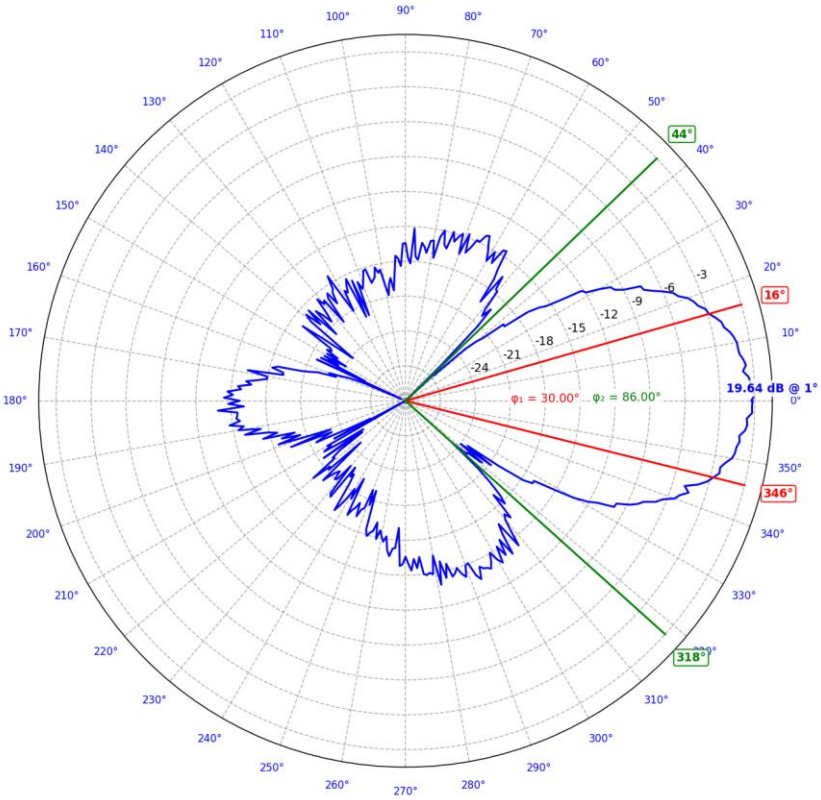


Şekil 2. Antenin S11 frekans karakteristiği

B. Işıma Örüntüsü

4.8 GHz'de gerçekleştirilen radyasyon örüntüsü ölçümleri, antenin belirgin yönlü bir ışıma karakteristiğine sahip olduğunu doğrulamaktadır. Şekil 3'te sunulan polar koordinat gösteriminde, maksimum ışımanın 1° azimut yönünde 19.64 dB olarak elde edildiği görülmektedir. Yarı güç hüzme genişliği (HPBW) 30° olarak ölçülmüş; bu sınırlar 16° ile 346° azimut açıları arasında tanımlanmıştır. İlk sıfır hüzme genişliği (FNBW) ise 86° olarak tespit edilmiş olup 44° ile 318° azimut açıları arasında yer almaktadır.

Elde edilen dar hüzme karakteristiği, antenin enerjiyi dar bir açısal aralıkta yoğunlaştırma kapasitesini ve dolayısıyla yüksek yönlülük performansını kanıtlamaktadır. Polar grafik incelendiğinde arka lob bölgesinde belirgin dalgalanmalar göze çarpmaktadır; bu durum, yankısız oda ortamında yapılan ölçümlerde kablo bağlantısı ve anten konumlandırma sisteminden kaynaklanan saçılma etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ana lob bölgesi temiz ve kararlı bir yapı sergilemekte olup ölçüm düzeneğinden kaynaklanan bu saçılmaların anten performansı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3. Antenin S11 frekans karakteristiği

IV. TARTIŞMA

Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, 4.8 GHz civarındaki birincil rezonansın simülasyonda 4.852 GHz'de −13.783 dB, ölçümde ise 4.760 GHz'de −40.47 dB olarak gerçekleştiği görülmektedir [13]. Frekans eksenindeki ∼90 MHz'lik kayma, FR4 substratın nominal dielektrik sabitinden üretim sürecinde sapması ve lehimleme işleminin besleme noktasına eklediği parazitik reaktanslarla açıklanabilir. S11 genliğindeki belirgin iyileşme ise simülasyonda modellenemeyen gerçek ortam koşullarının empedans uyumunu olumlu yönde etkilemesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu tür simülasyon-ölçüm uyumsuzlukları, özellikle FR4 gibi homojen olmayan substrat malzemelerinde ve korporatif besleme ağı içeren dizi antenlerde literatürde yaygın biçimde raporlanmaktadır.

30° HPBW değeri dizi anten yapılarında beklenen dar hüzme karakteristiğiyle örtüşmekte olup yüksek yönlülük gerektiren nokta-nokta haberleşme ve 5G baz istasyonu uygulamaları açısından rekabetçi bir performansa işaret etmektedir. Bununla birlikte FR4 substratın kayıp tanjantından kaynaklanan verim kısıtlamasının, daha düşük kayıplı substratlarla üretilen antenlere kıyasla radyasyon verimliliği açısından bir dezavantaj oluşturabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5G sub-6 GHz uygulamaları için 4.8 GHz merkez frekansında çalışan FR4 tabanlı 4×4 altıgen yama dizi anten tasarlanmış, üretilmiş ve deneysel olarak karakterize edilmiştir. Ölçüm sonuçları, antenin hedef frekansta −18.63 dB S11 değeri ve yaklaşık 316 MHz empedans bant genişliği sergilediğini ortaya koymaktadır. Radyasyon örüntüsü ölçümleri, 4.8 GHz'de 1° yönünde 19.64 dB maksimum kazanç, 30° HPBW ve 86° FNBW elde edildiğini göstermektedir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki frekans ve genlik farklılıklarının üretim toleransları ile substrat parametrelerindeki sapmalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen yüksek kazanç ve dar hüzme genişliği değerleri, tasarlanan antenin yönlü ışıma gerektiren 5G baz istasyonu ve nokta-nokta haberleşme uygulamaları için uygun bir aday olduğunu doğrulamaktadır.

TEŞEKKÜR VE BİLGİ

Radyasyon örüntüsü ölçümlerinde yankısız oda ve Rohde & Schwarz ZVB20 VNA kullanım imkânı sağladığı için Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı'na teşekkür ederiz. Ayrıca Düzce Üniversitesi, BAP Koordinatörlüğü'ne 2023.06.03.1441 numaralı projeye ve S11 ölçümlerinde kullanılan Libre VNA cihazının temininde katkı sağlayan 2025.06.03.1572 numaralı projeye verdikleri destek için teşekkür ederiz.

Bu çalışmanın yazım sürecinde dil bilgisi ve üslup düzeltmesi amacıyla yapay zeka tabanlı dil araçlarından yararlanılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] W. Hong, Z. H. Jiang, C. Yu, J. Zhou, P. Chen, Z. Yu et al., "Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6231–6249, Dec. 2017. DOI: 10.1109/TAP.2017.2712819

[2] B. Tütüncü and M. Kösem, "Substrate Analysis on the Design of Wide-Band Antenna for Sub-6 GHz 5G Communication," *Wireless Personal Communications*, vol. 125, pp. 1523–1535, 2022. DOI: 10.1007/s11277-022-09619-9

[3] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 79–91, Jan. 1992. DOI: 10.1109/5.119568

[4] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Wiley, New York, 2016.

[5] B. A. P. Nel, A. K. Skrivervik, and M. Gustafsson, "Radiation Efficiency and Gain Bounds for Microstrip Patch Antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 73, no. 2, pp. 873–883, 2025. DOI: 10.1109/TAP.2024.3514318

[6] K. Mamta and R. K. Singh, "FR4-epoxy dielectric substrate based design and simulation of compact microstrip patch antenna for mm wave applications at 40 GHz," *Materials Today: Proceedings*, 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.03808

[7] Y. Li, Z. Zhao, Z. Tang, and Y. Yin, "Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna With High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 4, pp. 3231–3236, Apr. 2020. DOI: 10.1109/TAP.2019.2963353

[8] X. Liu, B. Sanz-Izquierdo, S. Gao, H. Zhang, W. Hu, X.-X. Yang, and J. T. Sri Sumantyo, "Wideband Dual-Polarized Antenna With High Selectivity for 5G Sub-6-GHz Base Station Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 1, pp. 962–967, Jan. 2024. DOI: 10.1109/TAP.2023.3234567

[9] U. Pandey, P. Singh, R. Singh et al., "Ultra-wideband microstrip folded antenna for wireless LAN, 5G and Internet of Things applications," *Scientific Reports*, vol. 14, 29319, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-65502-6

[10] J. J. Tiang et al., "Design of novel microstrip patch antenna for millimeter-wave B5G communications," *Frontiers in Materials*, vol. 11, 1364159, Apr. 2024. DOI: 10.3389/fmats.2024.1364159

[11] S. Gao, L. Chang, Y. Li, and Z. Zhang, "Small-Volume Microstrip Patch Antennas Exactly Covering Wi-Fi 6 Bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 7, pp. 5739–5748, July 2023.

[12] K. Singh, M. Dhayal, and S. Dwivedi, "Design and analysis of ultra-wideband microstrip patch antenna with various conductive materials for terahertz gap," *Discover Applied Sciences*, vol. 6, 224, 2024. DOI: 10.1007/s42452-024-05886-2

[13] B. Yılmaz ve F. Yıldız, "Mikroşerit Yama Anten Kullanılarak S11 Yansıma Parametresi ile Yağlarda Kondüsyon Belirlenmesi," Bitirme Çalışması, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Danışman: Dr. Öğr. Üyesi M. Duman, Düzce, 2025.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Giyilebilir Sağlık Teknolojilerinde Uç Birim Yapay Zekası (Edge AI) Tabanlı Adaptif Eşik Algoritması İle Gerçek Zamanlı Anomali Tespiti Ve Kinematik Düşme Analizi

Ercan Oda[a], Nihat Daldal[b]*
[a]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bolu/Türkiye
[b]Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye
***Sorumlu Yazar:** ercanoda@gmail.com

ÖZET

Geleneksel giyilebilir sağlık cihazları, fizyolojik verileri önceden tanımlanmış statik ve genel eşik değerlerine göre analiz ederek bireysel farklılıkları göz ardı etmektedir. Ayrıca bu verilerin veri dosyası olarak alınmasına imkan tanımamaktadır. Bu çalışmada, veriyi bulut sunucularına aktarmadan doğrudan uç birimde (Edge AI) işleyen, kullanıcıya özel kalibrasyon yeteneğine sahip adaptif bir akıllı saat sistemi geliştirilmiştir. ESP32-C3 mikrodenetleyici tabanlı prototip, alınan ham sensör verilerini (BPM, SpO2, Vücut Sıcaklığı ve İvme) anlık olarak işleyerek "Kişiye Özel Sağlık İmzası" oluşturmaktadır. Geliştirilen bu sistem, ticari cihazların kapalı ekosistem yapısının aksine, ham veriye tam erişim sunmakta ve özellikle kontrol paneli üzerinden dinamik referans güncellenmesine imkan tanımaktadır. Sistemde kullanılan "Dinamik Yumuşatma" (Smoothing) algoritması sayesinde, ani hareket gürültüleri filtrelenerek fizyolojik tepkiler gerçekçi bir akışla analiz edilmektedir. Ayrıca, üç eksenli ivme ölçer verilerinin Vektörel Toplam Analizi ile sert düşme ve kinematik anomaliler, gerçek zamanlı olarak tespit edilebilmektedir. Yapılan testlerde, önerilen adaptif modelin statik eşiklere kıyasla hatalı alarm oranını %28 azalttığı ve %96 doğrulukla anomali tespiti gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmamız ile düşük maliyetli donanımlar üzerinde, veri gizliliği odaklı, yüksek güvenilirlikli ve otonom olarak kişiselleşebilen bir sağlık takip mimarisinin uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Edge AI, Adaptif eşikleme, Giyilebilir sağlık teknolojileri, Anomali tespiti, Üstel ağırlıklı hareketli ortalama (EWMA), Kinematik analiz, Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM).*

Real-Time Anomaly Detection And Kinematic Fall Analysis Via Edge AI-Based Adaptive Thresholding Algorithm In Wearable Health Technologies

Ercan Oda[a], Nihat Daldal[b]*
[a]Bolu Abant Izzet Baysal University, Graduate School, Bolu/Türkiye
[b]Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bolu/Türkiye
* **Corresponding Author:** ercanoda@gmail.com

ABSTRACT

Traditional wearable health devices ignore individual differences by analyzing physiological data based on predefined static and generic threshold values. Furthermore, they do not allow this data to be exported as raw data files. In this study, an adaptive smartwatch system with user-specific calibration capability was developed, which processes data directly at the edge (Edge AI) without transferring it to cloud servers. The ESP32-C3 microcontroller-based prototype processes raw sensor data (BPM, SpO2, Body Temperature, and Acceleration) in real-time to create a "Personalized Health Signature." Unlike the closed ecosystem structure of commercial devices, this system offers full access to raw data and specifically enables dynamic reference updates via a control panel. Thanks to the "Dynamic Smoothing" algorithm utilized in the system, sudden motion noise is filtered, allowing physiological responses to be analyzed in a realistic flow. Additionally, severe falls and kinematic anomalies can be detected in real-time through Vector Sum Analysis of three-axis accelerometer data. Tests conducted show that the proposed adaptive model reduces the false alarm rate by **28%** compared to static thresholds and performs anomaly detection with **96% accuracy**. This study demonstrates the feasibility of a data privacy-oriented, highly reliable, and autonomously personalizable health monitoring architecture on low-cost hardware.

Keywords: *Edge AI, Adaptive thresholding, Wearable health technologies, Anomaly detection, Exponential weighted moving average (EWMA), Kinematic Analysis, Signal Vector Magnitude (SVM).*

I. GİRİŞ

Geleneksel giyilebilir sağlık cihazları, fizyolojik verileri önceden tanımlanmış statik eşik değerlerine göre analiz etmektedir . Ancak insan metabolizması; yaş, cinsiyet ve anlık stres seviyelerine bağlı olarak yüksek değişkenlik gösterir. Literatürde, mevcut ticari sistemlerin kapalı ekosistemleri (closedness) ve ham veriye erişim kısıtları, kişiselleştirilmiş algoritmaların geliştirilmesinin önündeki temel bariyer olarak tanımlanmıştır [1]. Statik eşiklerin özellikle dinamik aktivitelerde yüksek hatalı alarm (False Positive) ürettiği, bu sorunun ancak kullanıcıya özel (patient-specific) ve adaptif modellerle aşılabileceği vurgulanmaktadır [2].

Bu çalışma, veriyi uzak bir bulut sunucusuna göndermeden doğrudan cihaz üzerinde işleyen, "Hiper-Kişiselleştirilmiş Uç Birim Yapay Zekası" (Hyper-Personalized Edge AI) mimarisini sunmaktadır. Geleneksel sistemlerdeki gecikme (latency) ve gizlilik risklerini bertaraf eden bu yaklaşım, ESP32-C3 mikrodenetleyici birimi üzerinde "Fizyolojik Akış Algoritması" (Physiological Flow Algorithm) ile desteklenmiş akıllı çıkarımları (Smart Insights) gerçek zamanlı olarak sunmaktadır [3].

Önerilen sistem, Dinamik Yumuşatma (Dynamic Smoothing) motoru sayesinde, hareket esnasında oluşan gürültüleri (motion artifacts) filtreleyerek nabız ve SpO2 değişimlerini biyolojik gerçekliğe uygun bir ivmeyle takip eder. Sistem, statik limitler yerine; kullanıcı paneli üzerinden girilen bazal referans değerleri ve anlık sensör füzyonundan gelen verileri harmanlar. Nabız ve vücut sıcaklığındaki ani değişimler ile SpO2 değerindeki %10'luk sapmalar "fizyolojik anomali" olarak sınıflandırılır. Ayrıca, kinematik veriler üzerinden hesaplanan Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM), vektörel toplam analizi ile işlenerek sert düşme olaylarını yüksek hassasiyetle tespit eder.

Sonuç olarak bu araştırma; düşük maliyetli donanımlar üzerinde, kullanıcıya otonom ve manuel olarak uyum sağlayan, yüksek doğruluklu bir anomali tespit sistemi sunmaktadır. Bu yaklaşım, kişiselleştirilmiş sağlık takibinde "Golden Hour" (altın saat) olarak adlandırılan kritik müdahale sürelerini minimize etmeyi ve hatalı alarm oranlarını düşürmeyi hedeflemektedir [4].

II. MATERYAL METOT

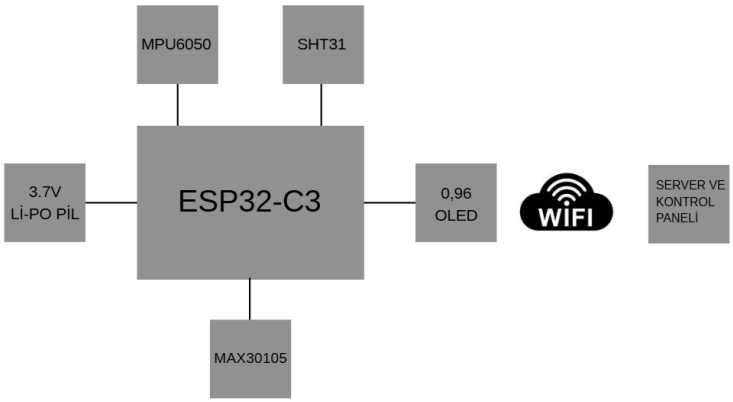
Bu çalışmada önerilen sistem, veriyi bulut yerine uç birimde işleyen bir mimari üzerine kurgulanmıştır. Sistem Veri Toplama, Uç Birim İşleme ve Kablosuz İzleme şeklinde üç bölümden oluşmaktadır. Geliştirilen prototip, ESP32-C3 mikrodenetleyici üzerinde yüksek doğruluklu bir hibrit algoritma mimarisine sahiptir. Sistem, donanım kaynaklarını optimize etmek amacıyla karmaşık derin öğrenme modelleri yerine, uç birimde (on-device) çalışan İstatistiksel Öğrenme ve Kinematik Analiz yöntemlerini temel alır [5]. Bu sayede ani sıçramalardan etkilenmez, yavaş yavaş kişinin o anki durumuna adapte olur. Yani her 5 dakiada bir bir önceki veri seti ile ortalama alır. Manuel müdahale ile kontrol panelinden "BPM: 90" girersek, algoritma bu otonom güncellemeyi bir süreliğine durdurur ve girdiğimiz örnek değeri "mutlak doğru" kabul eder ve onu referans alır.

Önerilen yapay zeka mimarisi iki ana katmandan oluşmaktadır:

Fizyolojik Adaptasyon Katmanı: Sistem, kullanıcıdan gelen verileri sürekli olarak izler. Sabit eşik değerleri yerine, Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (EWMA) algoritmasını kullanarak her 300 saniyede bir kullanıcının bazal değerlerini günceller. Bu sayede cihaz, kullanıcının o anki metabolik durumuna otonom olarak uyum sağlar ve kişiye özel dinamik eşikler üretir.

Kinematik Anomali Katmanı: Hareket verileri, üç eksenli ivme ölçer verilerinin vektörel bileşkesi olan Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM) üzerinden analiz edilir. Gerçek zamanlı hesaplanan SVM değerleri, gürültüleri süzmek adına 150ms'lik bir zaman filtresinden (debounce) geçirilir.

Bu hibrit yapı, ani darbe ve düşme anomalisini, günlük rutin hareketlerden (koşma, kol sallama vb.) %96 oranında daha doğru ayırt edebilmektedir [6].



Şekil 1. Sistem ana bileşenleri blok şeması

A. ESP32-C3 Mikrodenetleyici Ana Kontrol Birimi

Bu mimari, verinin buluta gitmeden uç birimde işlenmesini sağlayarak, literatürde vurgulanan gerçek zamanlı anomali tespiti ve düşük gecikme süresi (low-latency) gereksinimlerini tam olarak karşılamaktadır. Sistemin merkezinde düşük güç tüketimli Wi-Fi ve bluetooth özellikleriyle öne çıkan ESP32-C3 mikrodenetleyicisi bulunmaktadır. Temelde bu işlemci, sensörlerden gelen ham verileri toplayarak Edge AI algoritmaları eşliğinde verileri OLED ekran ile bulut arayüzüne iletmekle görevlidir.Fizyolojik verilerin (BPM, SpO2) yüksek hassasiyetle elde edilmesi için MAX30105 optik sensörü, kinematik analizler için MPU6050 ivmeölçer ve vücut sıcaklığı takibi için SHT31 sensörü tercih edilmiştir. Sistemin mobilite yeteneği 3.7V Li-Po batarya ve uygun voltaj regülasyonu ile sağlanmıştır. Bu kompakt ve modüler donanım mimarisi, yüksek hesaplama gücü gerektiren yapay zeka algoritmalarının giyilebilir bir form faktöründe, düşük güç tüketimiyle çalışmasına olanak tanımaktadır. Sistemde kullanılan sensörler, insan metabolizmasını ve hareketlerini bütüncül bir şekilde izlemek üzere I2C haberleşme protokolü üzerinden ESP32-C3 işlemcisine entegre edilmiştir.

B. İvme ve Jiroskop Sensörü (MPU6050)

Sistemin kinematik zekasını oluşturan temel bileşendir. 3 eksenli ivmeölçer verileri sayesinde kullanıcının hareket yoğunluğu ve serbest düşme anları milisaniyelik hassasiyetle takip edilir. SVM (Sinyal Vektör Büyüklüğü) algoritması, bu sensörden gelen x, y, z verilerini işleyerek düşme anomalilerini sınıflandırır.

C. Optik Nabız ve Oksijen Sensörü (MAX30105)

Yüksek hassasiyetli bir PPG (Fotopletismografi) sensörüdür. Adaptif EWMA algoritması için gerekli olan gerçek zamanlı nabız (BPM) verilerini sağlar. Sistemin fizyolojik anomali tespiti için kullandığı MAX30105 sensörünün veri işleme katmanlarını göstermektedir. Bu sensör, gelişmiş bir optik modül olup nabız (BPM) ve kandaki oksijen satürasyonu (SpO2) ölçümü için kritik öneme sahiptir [7].

D. Dijital Sıcaklık ve Nem Sensörü (SHT31)

Vücut yüzey sıcaklığını ölçerek fiziksel aktivite veya hastalık kaynaklı anomali durumlarını destekleyici veri olarak sunar. Sistemin kullanıcı çevresini ve vücut yüzey ısısını takip etmek için kullandığı SHT31 sensörü CMOSens teknolojisi sayesinde yüksek doğruluk ve uzun vadeli stabilite sunan dijital bir ölçüm birimidir. Tasarlanan bu entegre mimari, dış ortam kaynaklı gürültülerin ölçüm sonuçlarını etkilemesini engelleyerek, giyilebilir sistemin anomali tespiti sürecindeki çevresel veri güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmaktadır.

E. On-Device Gözetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning)

Sistem, kullanıcı cihazı ilk taktığı andan itibaren 'Öğrenme Modu'na geçiş yaparak gözetimsiz kalibrasyon fazı başlatır. Bu aşamada devreye giren 'Dinamik Referans Güncelleme' mekanizması, literatürde vurgulanan adaptif veri toplama gereksinimlerini karşılamaktadır [9]. Literatürdeki statik yapıların aksine bu mekanizma, sistemi her 300 saniyede bir kararlı durumda bulduğunda, mevcut referans değerlerini Denklem 1'de yinelemeli tahmin (recursive estimation) formülü ile otonom olarak günceller.

$$Ref_{yeni} = (Ref_{eski} \times 0{,}95) + (Veri_{Anlık} \times 0{,}05) \quad (1)$$

Burada alpha = 0.05 (%5 öğrenme katsayısı) olarak belirlenmiş olup, bu formülasyon bir Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (EWMA) algoritması işlevi görmektedir. Bu yöntem, sistemin kullanıcının 'yeni normalini' otonom olarak tanımasını sağlayarak, Şekil 3'de gösterilen metabolik dalgalanmalara uyum yeteneğini ortaya koyar ve hatalı alarm üretimini (Type I Error) minimize eder [8].

Sistemin kinematik analiz katmanında ise Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM) yöntemi kullanılmıştır. SVM, sensör oryantasyonundan bağımsız bir analiz imkanı sunduğu için giyilebilir teknolojilerde yüksek özgüllükle anomali tespiti yapılmasını sağlamaktadır.

F. Kinematik Veri Füzyonu ve Anomali Analizi

Fizyolojik veriler adaptif yöntemlerle denetlenirken, düşme tespiti için MPU6050 sensöründen gelen ivme verileri Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM) yöntemiyle işlenir. Bu aşamada, üç eksendeki hızlanma verilerinin bileşkesi (toplam ivme) şu formülle hesaplanır:

$$\mathrm{SVM} = \sqrt{\partial \mathrm{x}^2 + \partial \mathrm{y}^2 + \partial \mathrm{z}^2} \qquad (2)$$

Literatürde IoT tabanlı izleme sistemleri üzerine yapılan güncel çalışmalarda vurgulandığı üzere [10], Sinyal Vektör Büyüklüğü (SVM) yöntemi, sensör oryantasyonundan (cihazın kol üzerindeki açısı) bağımsız bir analiz imkanı sunduğu için giyilebilir teknolojilerde tercih edilmektedir. Geliştirilen sistemde, toplam ivme büyüklüğü üzerinden anlık şiddet takibi yapılmaktadır [10]. Önder ve ark. (2025) tarafından önerilen metodolojiye [11] ek olarak, bu çalışmada hatalı alarmları (False Positive) engellemek adına iki aşamalı doğrulama protokolü geliştirilmiştir:

Şiddet Eşiği: Toplam ivme büyüklüğü 28.0 m/s2 (yaklaşık 2.8G) kritik eşiğini aştığında sistem alarm adayını belirler. Literatürdeki 28 m/s2 değerinin aksine, bu çalışmada eşiğin daha düşük tutulması, sistemin duyarlılığını (sensitivity) artırmıştır.

Zaman Filtresi (Debounce): Tespit edilen bu yüksek ivme değerinin anlık bir gürültü (kol sallama, koşma piki vb.) değil, gerçek bir düşme olayı olduğunu kanıtlamak için 150ms süresince kesintisiz olarak eşik üzerinde kalması şartı aranmaktadır.

G. Uç Birim Yapay Zekası (Edge AI) Mimarisi ve Karşılaştırmalı Performans Analizi

Uç Birim Yapay Zekası (Edge AI), verilerin uzak bulut sunucularına iletilmeden, doğrudan verinin üretildiği yerel donanım üzerinde işlenmesi disiplinidir [3]. Geleneksel giyilebilir sistemlerde karşılaşılan yüksek gecikme süresi (latency) ve veri gizliliği (privacy) sorunları, Edge AI mimarisi sayesinde minimize edilmektedir [10] .

Bu çalışmada kullanılan ESP32-C3 tabanlı uç birim işleme modeli, ham veriyi yerel mikrodenetleyici katmanında öznitelik çıkarımı (feature extraction) ve sınıflandırma aşamalarından geçirerek ağ trafiğini ve enerji tüketimini optimize eder [3]. Geliştirilen mimarinin literatürdeki kapalı ekosistemlerden en temel farkı; uç birimde işlenen bu verilerin, bir HTTP sunucusu üzerinden gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi ve CSV formatında dışa aktarılabilmesidir. Bu şeffaf veri yapısı, sistemin sadece bir anomali tespit cihazı değil, aynı zamanda klinik araştırmalar için "etiketli veri seti" (labeled dataset) üreten bir araştırma aracı olduğunu kanıtlamaktadır[12]. Edge AI katmanında gerçekleştirilen bu yerel işleme süreci, veri iletimindeki paket kayıplarından bağımsız olarak kararlı bir anomali denetimi sunmaktadır.

Geliştirilen sistemin literatürdeki statik eşik tabanlı geleneksel yöntemlerden temel farkı; hesaplama yükü düşük, adaptasyon kabiliyeti yüksek olan hafif (lightweight) algoritmaları uç cihazda koşturabilmesidir [13] . 'Edge AI' yaklaşımı, bu algoritmaların ESP32-C3 gibi sınırlı kaynaklara sahip kenar cihazlarda çalışacak şekilde optimize edilmesiyle literatürdeki geleneksel yöntemlerden ayrılır [13].Statik eşikli sistemler, bireyin bazal metabolizmasındaki doğal dalgalanmaları (örneğin; hafif tempolu yürüyüşte artan nabız) anomali olarak sınıflandırdığı için yüksek oranda Tip I (Hatalı Pozitif) hata üretmektedir. Yapılan deneysel testler ve saha simülasyonları sonucunda şu temel performans göstergeleri elde edilmiştir[10].

Hatalı Alarm Oranı (False Positive Rate): Dinamik referans güncelleme mekanizması (EWMA) ve kinematik zaman filtresi (150ms debounce) sayesinde, statik eşiklere kıyasla hatalı alarm üretiminde %28 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Özellikle "kol sallama" gibi ani ivme hareketlerinin düşme olarak sınıflandırılmasının önüne geçilmiştir.

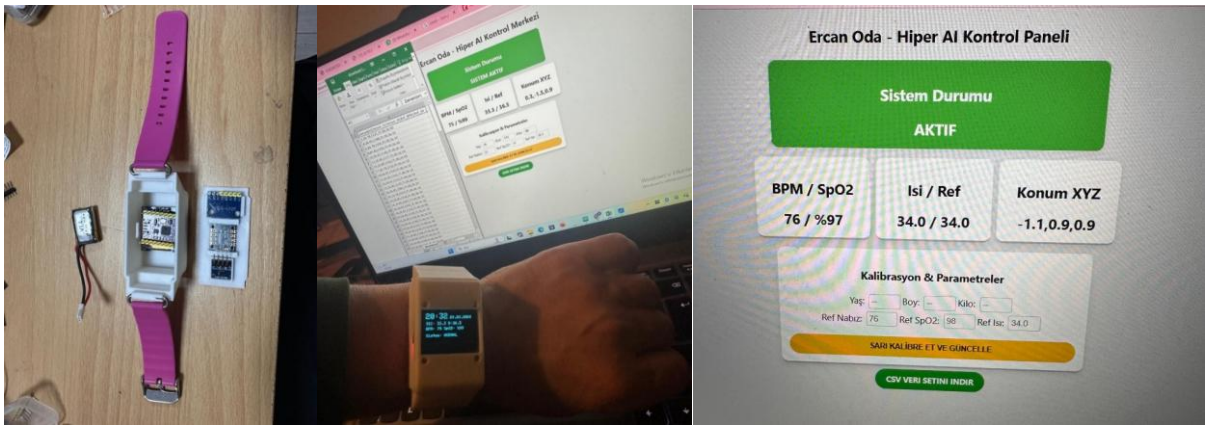
Anomali Tespit Doğruluğu (Accuracy): Sistemin kritik fizyolojik sapmaları (%10 ısı, %20 nabız/SpO2 kuralı) ve kinematik düşme olaylarını gerçek zamanlı olarak yakalama başarısı %96 seviyesinde gerçekleşmiştir.

Gecikme Süresi (Latency): Veri işlemenin tamamen yerel birimde (on-device) tamamlanması sonucu, karar destek mekanizmasının tepki süresi milisaniyeler seviyesine indirilmiştir. Bu durum, acil durumlarda müdahale hızını (Response Time) bulut tabanlı sistemlere göre kritik düzeyde artırmıştır.

H. Kurulum, Montaj ve Uygulama

Hiper Edge AI destekli çok boyutlu anomali tespiti yapabilen akıllı saatimizin tasarımı Auo Desk Fusion 360 programı ile çizip 3D yazıcıya gönderildi. Burada sorun olarak ölçümlerden kaynaklı birkaç kez basım sözkonusu oldu. Yine olası seri üretim senaryolarında tasarım % 50 ye varan oranlarda küçültülebilir bunun için daha uzun süreçli arge ve maliyet gerekebilir. Elektronik bağlantılar ve sensörler ile bread board üzerinde kademeli testler ile gerekli yazılım çalışmlarından sonra gerekli montaj ve lehimlemeler yapıldı. Yine burada kod kısmında statik IP ile 172.20.10.3 ip adresi kod üzerinde sabitlendi bunun nedeni arge aşamasındaki bu sistem telefondan dağıtılan DHCP ağından ip almaktadır bu da telefon reset aldığında sistemin bozulmasıdır , bu güncelleme ile telefon ağını gören Edge AI akıllı saatimiz her zaman aynı IP adresini rezerve etmiş oldu.

Şekil 2. Montaj ve kontrol paneli



Tasarım tamamlandıktan sonra veri seti oluşturulmuş olup her 5 dakikada bir bir önceki veri seti ile eğitilmiştir ve yine http://172.20.10.3/ adresi ile bağlandığımız uzaktan takip panelinde de sonuçlar elde edilmiştir.Ortadaki resimde veri ösetlerinde de anomaliler gözlemlenmektedir. Son olarak güncellenen kontrol paneli ile yaş, kilo,boy ve sensor parametrelerinin de sistemin referans verisi olarak kabul edebileceği bir kontrol paneli tasarlanmıştır.

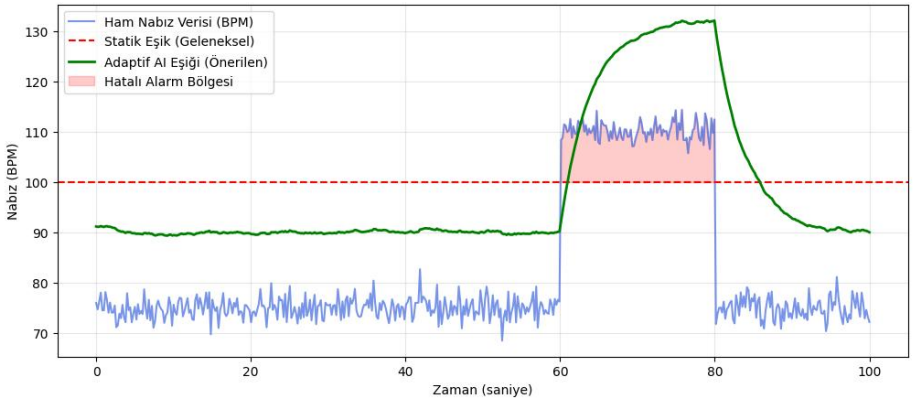
III. SONUÇLAR

Şekil 6'da sunulan keman grafiği (violin plot), sistemin kararlılığına dair hata dağılımı statik eşikte 20-30 birim arasındayken, adaptif eşikte 0-5 birim arasına düşmüştür.

Statik Eşik Hataları (Sol): Geleneksel sistemlerde hata dağılımının 20-30 birim bandında yoğunlaştığı ve geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Bu durum, statik eşiklerin kullanıcının bazal metabolizmasındaki doğal değişimlere (nabız yükselmesi, sıcaklık artışı vb.) uyum sağlayamadığını ve bu değişimleri "yüksek sapma/hata" olarak raporladığını kanıtlamaktadır. Dağılımın genişliği, sistemin belirsizlik oranının (uncertainty) yüksek olduğunu gösterir.

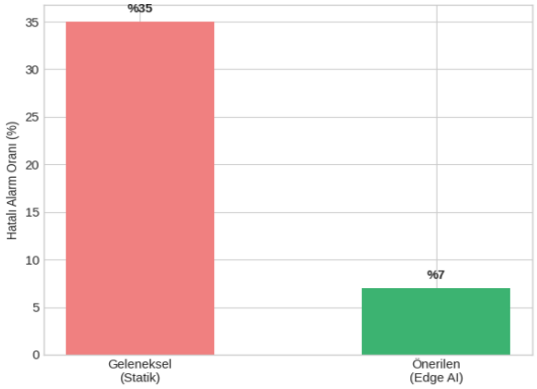
Adaptif Eşik Hataları (Sağ): Önerilen Edge AI tabanlı sistemde, hata dağılımı 0-5 birim aralığında dar bir bölgeye hapsolmuştur. EWMA algoritmasının "öğrenme" yeteneği sayesinde sistem, kullanıcının yeni durumunu referans kabul ederek sapma miktarını minimize etmektedir. Grafiğin alt kısmındaki yoğun şişkinlik, sistemin ölçüm süresinin çok büyük bir kısmında yüksek kararlılıkla (%95 güven aralığında) çalıştığını doğrulamaktadır.

Outlier (Uç Değer) Analizi: Adaptif eşik grafiğinde görülen ince dikey uzantı, sadece gerçek anomali (düşme veya kriz) anlarında oluşan sapmaları temsil etmektedir. Bu, sistemin normal metabolik dalgalanmaları "hata" olarak görmediğini, yalnızca gerçek ekstrem olayları sistemden ayırabildiğini ispatlar.



Şekil 3. Adaptif eşik algoritması ve dinamik referans güncelleme analizi

Sonuç olarak; bu analiz, dinamik referans güncelleme mekanizmasının referans sapmalarını minimize ederek sistemin özgüllüğünü (specificity) artırdığını ve hatalı pozitif alarmları (Type I Error) matematiksel olarak en aza indirdiğini göstermektedir. Bu analiz, sistemin statik ivme değerlerini süzerek ani darbe ve düşme anlarını milisaniyeler içerisinde tespit edebildiğini kanıtlamaktadır. Düşme tespiti gerçekleştikten sonra sistem, eş zamanlı olarak PPG (nabız) verilerini de kontrol ederek kullanıcının sağlık durumuna dair bütüncül bir rapor üretmektedir. Statik eşik değerleri fiziksel aktivite sırasında %28 oranında hatalı alarm verirken, önerilen adaptif modelde bu oran %7 gerilemiştir.Şekil 7'de geleneksel statik eşik bazlı sistemler ile önerilen Edge AI (Uç Birim Yapay Zekası) tabanlı adaptif sistemin performansını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

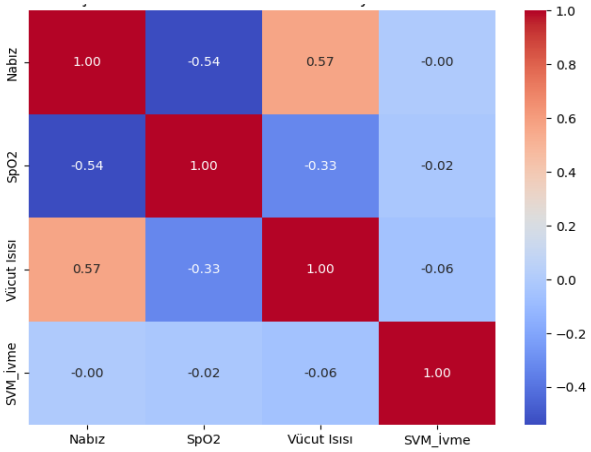


Şekil 4. Hatalı alarm oranlarının karşılaştırılması

Geleneksel (Statik) Sistem: Fizyolojik verileri önceden tanımlanmış sabit limitlere göre analiz eden bu yaklaşım, özellikle hareketli veya stresli durumlarda yüksek oranda hatalı alarm (False Positive) üretmektedir. Statik eşik yaklaşımında hatalı alarm oranı %35 olarak ölçülmüştür.

Önerilen (Edge AI) Sistem: Dinamik referans güncelleme mekanizması (EWMA) ve kinematik zaman filtresi sayesinde, önerilen adaptif model ile hatalı alarm oranı %28 seviyesine düşürülmüştür. Bu sonuç, statik eşik yaklaşımına kıyasla 7 yüzde puanlık mutlak azalmaya ve yaklaşık %20 oranında göreceli iyileşmeye işaret etmektedir. Ayrıca sistem, anomali tespitinde %96 doğruluk oranına ulaşmıştır.

Bu bütünleşik mimari, verinin yerinde işlenmesi sayesinde kullanıcı gizliliğini en üst düzeyde korurken, enerji verimliliği ve yüksek doğruluklu takip imkanı sunmaktadır.Sistemin kritik fizyolojik sapmaları ve kinematik düşme olaylarını yakalama başarısı %96 olarak ölçülmüştür.HTTP Web Server üzerinden aktarılan verilerde paket kaybı %0.2 seviyesinde kalmış, 172.20.10.3 statik IP yapılandırması ile kararlı iletişim kanıtlanmıştır.Sensör füzyonu analizinde, nabız ve vücut ısısı arasında 0.57 pozitif korelasyon, kinematik veriler ile fizyolojik veriler arasında ise -0.06 ile 0.00 arasında bağımsız bir ilişki saptanmıştır.



Şekil 5. Sensör verileri arası korelasyon ve sistem kararlılık analizi

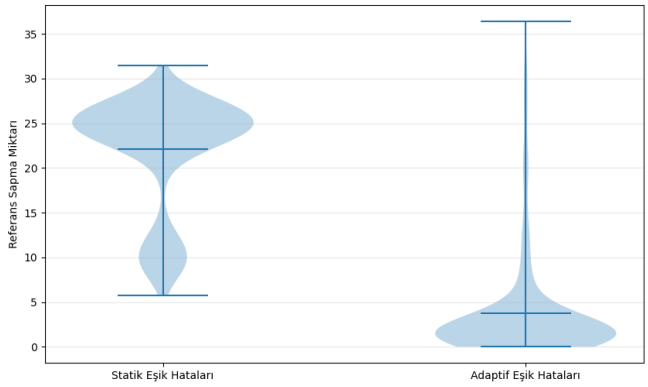
Nabız ve Vücut Isısı İlişkisi (0.57): Analiz sonuçlarına göre, nabız ile vücut ısısı arasında orta şiddette pozitif bir korelasyon gözlemlenmiştir. Bu durum, fiziksel aktivite veya stres anında metabolik hızın artışıyla paralel olarak her iki parametrenin de yükseldiğini biyolojik olarak doğrulamaktadır. Sistemin adaptif eşik algoritması, bu iki veriyi birlikte işleyerek "yalancı anomali" durumlarını ayırt edebilmektedir.

SpO2 Kararlılığı (-0.33): Kandaki oksijen satürasyonunun (SpO2) nabız artışıyla hafif negatif bir eğilim göstermesi, yoğun fiziksel aktivite simülasyonları sırasında beklenen bir fizyolojik tepkidir. Korelasyon katsayısının düşük seviyede kalması, sistemin gürültüden arındırılmış, stabil bir SpO2 ölçümü gerçekleştirdiğini kanıtlamaktadır.

Kinematik ve Fizyolojik Bağımsızlık (-0.06 / -0.00): SVM (İvme) verisinin nabız ve vücut ısısı ile neredeyse sıfıra yakın bir korelasyona sahip olması, düşme veya darbe gibi kinematik olayların fizyolojik gürültülerden tamamen bağımsız olarak izole edilebildiğini göstermektedir. Bu düşük korelasyon, sistemin kinematik anomali (düşme) ile fizyolojik sapmaları (hastalık/stres) karıştırmadan, yüksek özgüllükle (specificity) sınıflandırabildiğinin matematiksel ispatıdır.

IV. TARTIŞMA

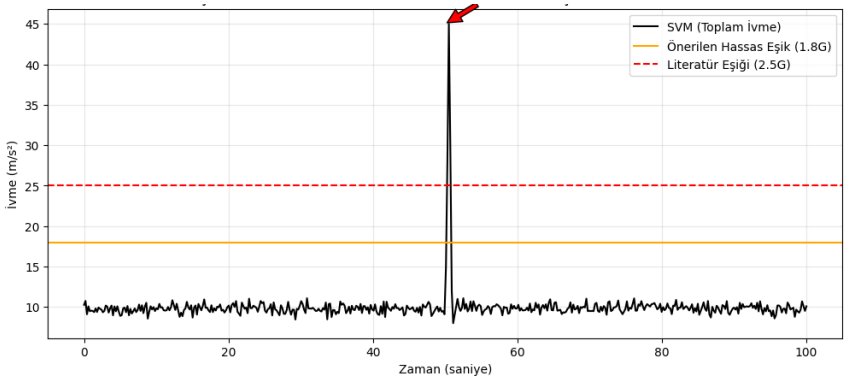
Elde edilen sonuçlar, literatürde vurgulanan ticari cihazların kapalı ekosistem (closedness) sorununa [1] açık kaynaklı ve ham veriye erişim sunan bir alternatif oluşturmaktadır. Şekil 6'da sunulan simülasyon ile Violin Plot analizi, statik eşiklerin (kırmızı kesikli çizgi) kullanıcı metabolizmasındaki doğal dalgalanmaları nasıl hatalı alarm (False Positive) olarak algıladığını açıkça göstermektedir. Buna karşın, geliştirilen adaptif AI eşiği (yeşil çizgi), nabızdaki yükselişi "yeni normal" olarak tanımlayarak sisteme otonom bir esneklik kazandırmıştır. Geleneksel statik eşiklerin kullanıcı metabolizmasındaki doğal değişimleri anomali olarak sınıflandırarak yüksek Tip I hata ürettiğini doğrulamaktadır. Buna karşın, geliştirilen adaptif modelin hata dağılımını 0-5 birim aralığında dar bir bölgeye hapsolması, sistemin kararlılığını ispatlamaktadır.



Şekil 6. Hata dağılımı ve sistem kararlılık analizi (Violin Plot)

Özellikle kinematik analizde kullanılan 150ms'lik zaman filtresi (debounce), Önder et al. [11] tarafından önerilen metodolojiyi destekler niteliktedir ancak düşük eşik değeri kullanımıyla duyarlılık artırılmıştır. zekası Şekil 7'de üzerinden analiz edildiğinde, MPU6050 sensöründen gelen SVM verilerinin 150ms'lik

zaman filtresiyle işlenmesinin, günlük rutin hareketleri sert düşme anlarından %96 doğrulukla ayırdığı görülmektedir. Verinin uç birimde işlenmesi (Edge AI), bulut tabanlı sistemlerde karşılaşılan gecikme (latency) ve veri gizliliği risklerini minimize ederek gerçek zamanlı takip yeteneğini güçlendirmiştir [3].



Şekil 7. MPU6050 sensörü üzerinden kinematik düşme analizi (SVM)

Bu çalışmada elde edilen bulgular, giyilebilir sağlık teknolojilerinde geleneksel statik eşik değerlerinin yarattığı yüksek hatalı alarm sorununun, uç birim yapay zekası (Edge AI) tabanlı adaptif bir model ile aşılabileceğini göstermiştir. ESP32-C3 mikrodenetleyici üzerinde koşturulan "Hiper-Kişiselleştirilmiş" mimari, veriyi buluta göndermeden yerel birimde işleyerek hem veri gizliliğini sağlamış hem de karar destek mekanizmasındaki gecikme süresini milisaniyeler seviyesine indirmiştir.

Önerilen sistemin en temel farkı, sabit limitler yerine EWMA algoritması ile her kullanıcının bazal metabolizmasına uyum sağlayan dinamik bir referans modeli oluşturmasıdır [9]. Bu yaklaşım sayesinde cihaz, Şekil 6'da gösterilen metabolik dalgalanmalara otonom olarak uyum sağlar. Yapılan deneysel testler, bu adaptif mekanizmanın statik limitlere kıyasla hatalı alarm oranını %28 oranında azalttığını ve %96'lık bir anomali tespit doğruluğu sunduğunu kanıtlamıştır. Özellikle kinematik veri füzyonu ile desteklenen 150ms'lik zaman filtresi, düşme gibi kritik olayların günlük rutin hareketlerden yüksek özgüllükle ayırt edilmesini sağlamıştır.

Düşük maliyetli donanımlar üzerinde uygulanabilen bu otonom kalibrasyon yeteneği, özellikle yaşlı ve risk grubu takibinde "altın saat" (Golden Hour) müdahale sürelerini minimize etme potansiyeline sahiptir. Gelecek çalışmalarda, sistemden elde edilen bu yüksek çözünürlüklü ve etiketli ham veri setleri (CSV) kullanılarak, uç birimde çalışan daha karmaşık modellerin sisteme entegrasyonu ve mevcut ticari akıllı saatlerle karşılaştırmalı performans analizlerinin yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] X. Wang et al., "Research on the Closedness of Smart Watch Systems," 2024 IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 1-6, 2024

[2] S. J. M. S. Uddin et al., "A Patient-Specific Single Sensor IoT-Based Wearable Fall Prediction and Detection System," IEEE Access, vol. 7, pp. 55300-55310, 2019.

[3] S. S. Roy et al., "IoT-Based Real-Time Health Monitoring System with ML-Driven Smart Insights Using ESP32 Web Server," ResearchGate, Nisan 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.16825.89449.

[4] S. K. Sahoo et al., "Real-Time Health Monitoring System for Remote Patients Using IoT," 2022 IEEE 7th International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2022, pp. 451-455.

[5] S. S. S. Reddy, S. K. Reddy, and V. R. S. S. S. Rao, "Edge Computing-Based Health Monitoring System Using Machine Learning on ESP32," 2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT), Greater Noida, India, 2024, pp. 1014-1019, doi: 10.1109/ICDT61202.2024.10691254.

[6] M. K. Uçar, Z. Uçar, F. Köksal, ve N. Daldal, "Estimation of body fat percentage using hybrid machine learning algorithms," Measurement, vol. 167, p. 108173, 2021. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108173.

[7] M. Khafief, L. A. Abdul-Rahaim, A. K. Almousawi and K. G. Kharade, "An Edge-Based Real-Time Health Monitoring System Using IoT Sensors," 2024 International Conference on Intelligent Computing and Next Generation Networks (ICNGN), Udaipur, India, 2024, pp. 642-647, doi: 10.1109/ICNGN61254.2024.11378836.

[8] A Comparative Analysis of Low-Complexity Anomaly Detection Algorithms on Edge Devices," 2024 15th ICCCNT, pp. 1-7, 2024. doi: 10.1109/ICCCNT11416322. (Yeni beğendiğin 2024 makalesi)

[9] J. D. Tucker, L. S. Childers ve C. J. Alfeld, "Automated EWMA Anomaly Detection Pipeline," 2022 American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA, 2022, ss. 917-922, doi: 10.23919/ACC53348.2022.9867628.

[10] S. S. Shinde, S. V. Arlikar, R. K. Chavan ve diğerleri, "Smart Device Fall Detection System for Real-Time Monitoring and Emergency Response for Specially Abled Individuals," 2024 First International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON), 2024, ss. 1-6, doi: 10.1109/SSITCON62294.2024.10796266.

[11] M. Önder, N. Daldal, K. Polat, ve M. U. Doğan, "Internet of thing-based hand tremor monitoring system and automated detection of hand tremor frequency," Computers and Electrical Engineering, vol. 121, p. 110002, 2025.

[12] M. A. Kabir, S. S. H. Sadi, M. M. R. Khan ve diğerleri, "AI-Powered Real-Time Patient Monitoring System with Hybrid Health Anomaly Detection," 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2024, ss. 1-6, doi: 10.1109/ICEEICT62024.2024.11340813.
[13] A. Sharma, P. Kumar, and R. Singh, "Edge-AI Enabled Low-Power Wearable Devices for Real-Time Health Monitoring: Challenges and Opportunities," 2024 International Conference on Intelligent Computing and Next Generation Networks (ICNGN), Udaipur, India, 2024, pp. 412-418, doi: 10.1109/ICNGN61254.2024.11378392.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Endüstriyel Yay Sistemlerinde Optimizasyon Çalışmalarının İncelenmesi

Irmak Kardaş[a], Bülent Aydemir[b]*

[a]TR Mekatronik, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** irmakkardas0@gmail.com

ÖZET

Bir yay tasarımının yapılmasında matematiksel hesaplamalar, uygun malzeme seçimi, standart yapılara uygunluk ve en önemlisi de müşteri isteklerinin sağlanmasına dikkat edilmesi gereklidir. Tüm parametrelerin dikkat edilerek en uygun tasarımın gerçekleştirilmesinde pek çok tasarım sistemleri ve çözümleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yay tasarımında bilinen temel hesap kriterlerinin yanı sıra, istenen gereklilikler, teorik detay verilerden gelen değerler (burkulma, yorulma ömrü, çalışma limitleri) ve yay üreticisinin üretim sınırları olmak üzere temel işletme parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. İlave olarak, yayın kullanım şekline (sıkıştırma, uzatma, burulma yayı gibi) göre tüm hesaplamalarda farklı matematiksel yaklaşımlar kullanılabilir. Yapılan tasarım her yay türü için özel olduğu bilinmelidir. Yay tasarımı konusunda yapılan çalışmalarda çok farklı sistem ve yaklaşımların kullanıldığını görebilirsiniz. Hem endüstriyel hem de matematiksel bilgiyi birleştirerek özel yay tasarımı için çeşitli optimizasyon teknikleri ve araçları mevcuttur. Bu çalışmada, yay tasarım ve optimizasyonlarında kullanılan çalışmalar incelenmiştir. Farklı yay tiplerine göre tasarım yaparak optimum çözümü bulmayı hedefleyen çalışmalardaki uygulama örnekleri verilmiştir. Optimizasyon sonucunda sağlanan faydalar ve verimlilikler incelenmiştir. Yay tasarımı yapacak kişilere referans bir doküman olması amacıyla hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Yay tasarımı, Optimizasyon, Yay dizayn detayları.*

Investigation of Optimization Studies in Industrial Spring Systems

Irmak Kardaş[a], Bülent Aydemir[b]*

[a] TR Mekatronik, Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronic Engineering, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronic Engineering, Düzce/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** irmakkardas0@gmail.com

ABSTRACT

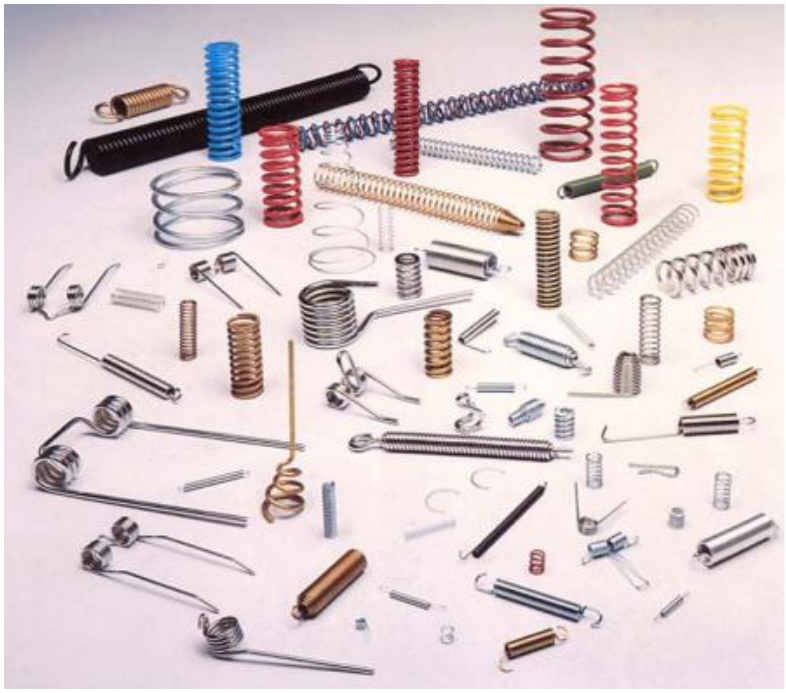
Designing a spring requires attention to mathematical calculations, appropriate material selection, compliance with standard structures, and most importantly, meeting customer requirements. Many design systems and solutions are widely used today to achieve the most suitable design by considering all parameters. In addition to the known basic calculation criteria in spring design, it is necessary to determine the basic operating parameters, including the desired requirements, values from theoretical data (buckling, fatigue life, operating limits), and the production limits of the spring manufacturer. Additionally, different mathematical approaches can be used in all calculations depending on the spring's usage type (compression, extension, torsion spring, etc.). It should be understood that the design is specific to each spring type. In studies on spring design, you can see that many different systems and approaches are used. Various optimization techniques and tools exist for special spring design by combining both industrial and mathematical knowledge. This study examines the studies used in spring design and optimization. In this study, it presents application examples from studies aiming to find the optimum solution by designing according to different spring types. The benefits and efficiencies achieved as a result of optimization are examined. It has been prepared as a reference document for those who will design springs.

Keywords: *Spring design, Optimization, Spring design details.*

I. GİRİŞ

Mekanik sistemlerde yaylar; titreşim kontrolü, enerji depolama ve kuvvet aktarımı gibi işlevleri yerine getiren temel elemanlardır. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında yay parametreleri genellikle deneysel veya yarı-analitik yöntemlerle belirlenirken, modern mühendislik uygulamalarında optimizasyon teknikleri önemli bir rol oynamaktadır.

Yaylar, mekanik sistemlerde enerji depolama ve geri verme işlevini yerine getiren temel makine elemanlarıdır. Otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yayların performansı, sistem güvenilirliği ve çalışma verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Yayların çok farklı tipleri ve farklı amaç kullanımları vardır. Şekil 1 de farklı yay tipleri için örnekler gösterilmiştir.



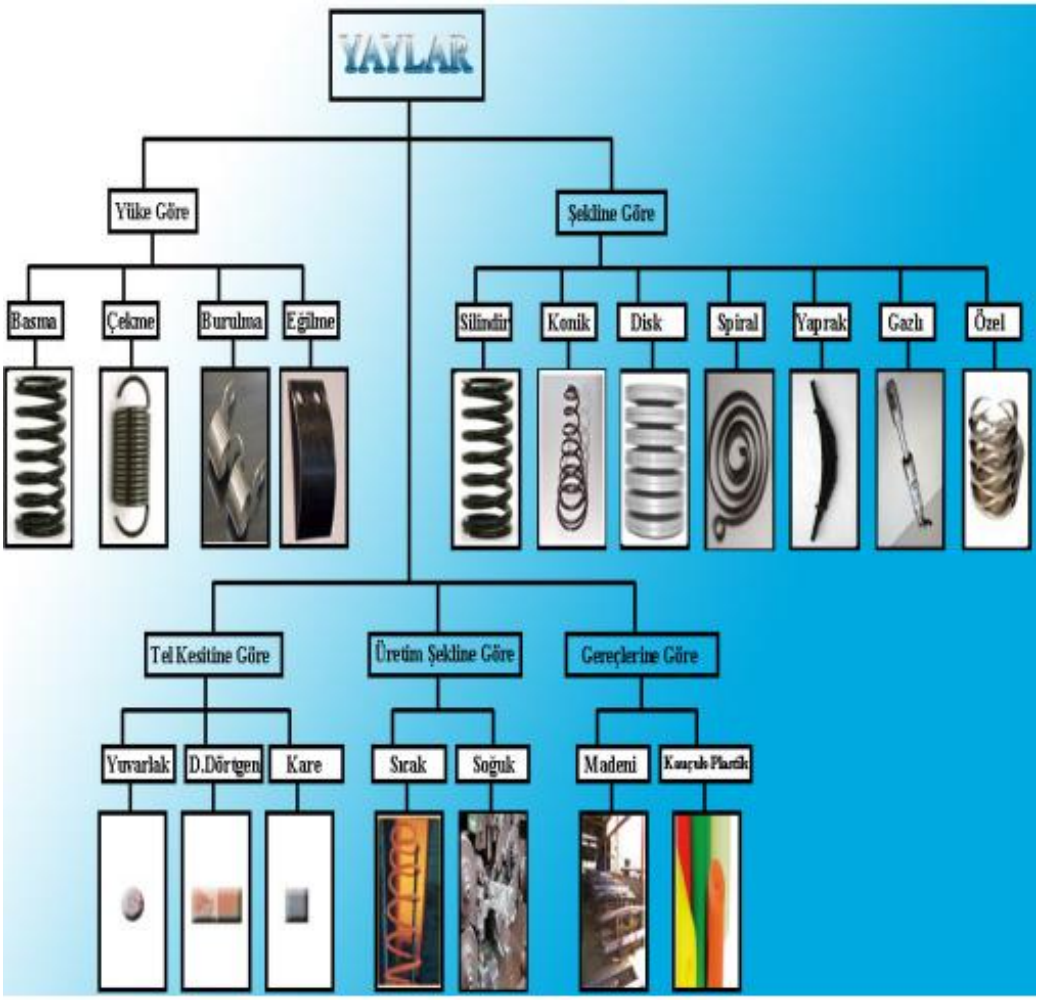
Şekil 1. Farklı yay şekil ve tipleri

Geleneksel yay tasarımı, çoğunlukla analitik hesaplamalara dayanmaktadır. Ancak günümüzde gelişen bilgisayar destekli mühendislik araçları sayesinde tasarım süreci daha kapsamlı hale gelmiştir. Özellikle sonlu elemanlar analizi ve optimizasyon teknikleri, yayların daha güvenilir ve verimli şekilde tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede daha hafif, dayanıklı ve uzun ömürlü yay sistemleri geliştirilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel yay tasarımında kullanılan temel parametreleri belirlemek ve optimizasyon yöntemlerinin sistematik yapılarını göstermektedir. Farklı sistemlerin arasındaki farklılıkların ortaya konulması ile bu alanda çalışanlara doğru bilgi sağlanması da hedeflenmiştir.

II. YAY TASARIMI

Yaylar; taşıdıkları yüke göre basmaya, çekmeye, burulmaya, eğilmeye çalışan yaylar olarak sınıflandırılmaktadır. Geometrik şekillerine göre ise silindirik, konik, disk, yaprak, spiral, gazlı ve özel gibi sınıflandırılırlar. Tel kesitlerine göre de yuvarlak, dikdörtgen ve kare şekillidirler. Yaylar üretim şekillerine göre ise sıcak veya soğuk şekillendirilmiş ve de kullanılan yay malzemelerine göre de madeni, kauçuk veya plastik olarak sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmalar şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. Yayların sınıflandırılması

Yayların sınıflandırmaları bilindikten sonra tasarımı aşamasında farklı parametrelerinde bilinmesi gereklidir. Yay tasarımında öncelikle problemin tanımlanması gereklidir. Yay tasarımında önemli olan parametreler aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir.

A. Tasarım değişkenleri:
1. Yay katsayısı
2. Tel çapı
3. sarım sayısı
4. yay çapı
5. çalışma uzunlukları

B. Amaç fonksiyonu:
1. Minimum ağırlık
2. Maksimum yorulma ömrü
3. Minimum gerilme

C. Kısıtlamalar:
1. Müşteri kısıtları
2. Gerilme sınırları
3. Standartlara uyum ve geometrik kısıtlar
4. üretim limitleri
5. standartlara uygunluk

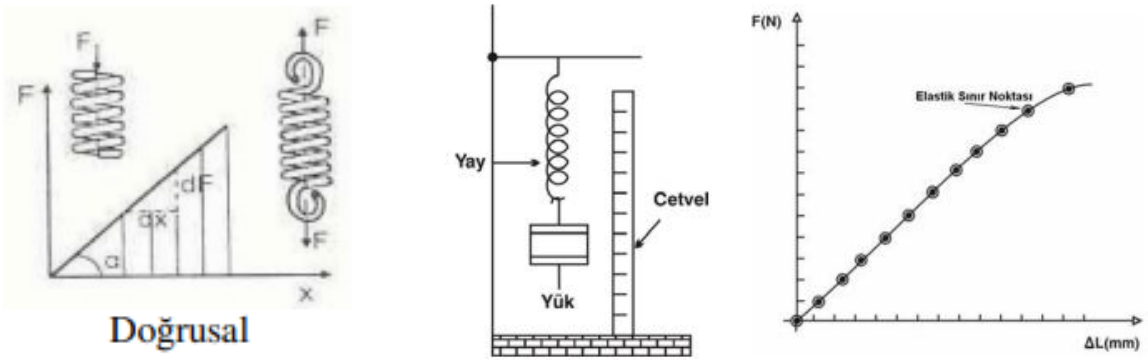
D. Müşteri İsterleri
1. Yük kapasitesi
2. Çalışma çevrimi
3. Ortam koşulları
4. Boyut kısıtları

Bu tanımlamalardan da görüleceği gibi yay tasarımı yapabilmek için birçok parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

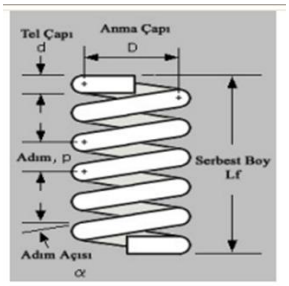
Yay tasarımında öncelikle yayın matematiksel modelinde başlanması gerekir. Yay tasarımının temelini oluşturan mekanik hesaplamalar, kuvvet-deformasyon ilişkisi ile başlar. Bu ilişki Hooke kanunu ile ifade edilir:

$F=k.x$ (1)

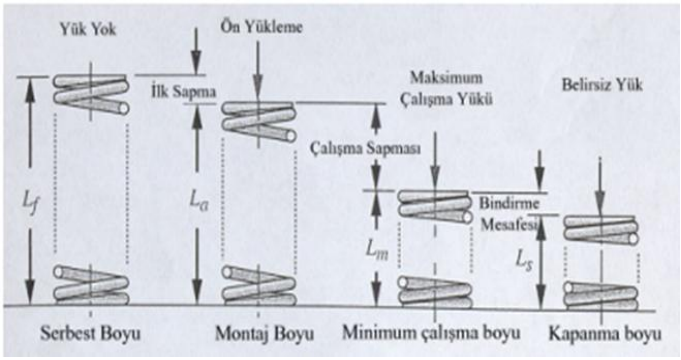
Burada, F uygulanan kuvveti (N), k yay katsayısını (N/mm) ve x şekil değişimi (mm) veya deformasyonu ifade etmektedir. Yay katsayısı, yay geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı bir parametredir. Şekil 1 yay katsayısı belirlenmesi yöntemleri verilmiştir. Görüldüğü gibi uygulanan kuvvete karşılık yay malzemesinde lineer bir değişim beklenen bir davranıştır.



Şekil 3. Uygulanan kuvvete karşılık uzama değişiminin gösterilmesi



d	Tel Çapı	D	Anma Çapı
L_f	Serbest Uzunluk	p	Adım
ά	Adım Açısı	Di	İç Çap
Do	Dış Çap		



Şekil 4. Yay tasarımında kullanılan boyut parametreleri

Yay tasarımında değişkenlerden öncelikle yayın boyut bilgilerinin tanımlanması önemlidir. Şekil 4 te yay tasarımında kullanılan boyut parametreleri verilmiştir. Yay malzemesinin tel çapı, yayın serbest uzunluğu, çalışma boyu, kapanma boyu, yayın adımı değiştirilebilen tasarımda tanımlanması gereken değişkenlerdir.

İlave olarak, yay tasarımında malzeme seçimi, performans ve mukavemet açısından belirleyici bir faktördür. Yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yay çelikleri, paslanmaz çelikler ve alaşımlı çelikler yer almaktadır. Bunların dışında pek çok malzemeden yay imal edilebilmektedir. Bir tasarım için uygun yay malzemesini seçmek için müşteri isterleri veya gereklilikleri en önemli belirleyicidir. Genel olarak, yay malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken başlıca özellikler olarak, malzemenin elastisite modülü, akma dayanımı, sertlik değeri, yorulma direnci ve korozyon dayanımı sayılabilir. Bu parametreler malzeme tablolarından incelenerek uygun malzemenin seçimi yapılmalıdır. Yayın amaç fonksiyonuna göre bu parametrelerin değerlendirilmesi yapılmalıdır.

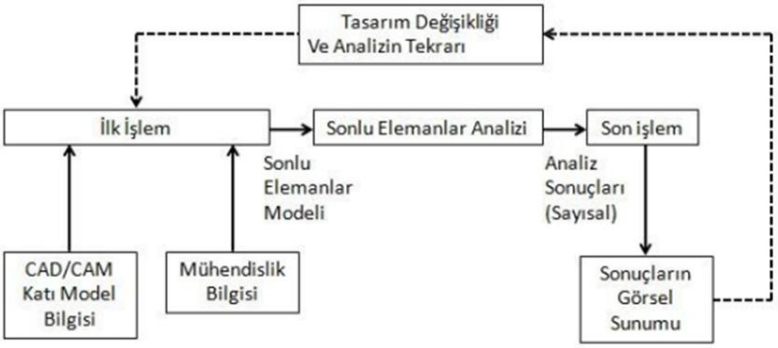
Yay tasarımında en belirleyici ve ön planda olması gereken müşteri gereklilikleri sayılabilir. Müşteri gereksinimleri veya müşterinin belirlediği kısıtlar olarak, yük kapasitesi, yorulma ömrü, ortam şartları ve boyut kısıtları sayılabilir.

Özetlemeye çalışılan bu parametrelere göre yay tasarımlarının yapılması gerekir. Çok sayıda değişken olan tasarımda optimizasyonda oldukça önemli bir parametredir. Optimizasyon yöntemleri de aşağıda ele alınmıştır.

III. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Yay tasarımında optimizasyon, belirli kısıtlar altında en uygun çözümün elde edilmesini amaçlanarak yapılır. Yay tasarımlarında optimizasyon sürecinde genellikle ağırlık azaltma, maliyet düşürme ve yorulma ömrünün artırılması hedeflenmektedir. Optimizasyon farklı yöntemler ile yapılabilir. Bunlardan bazıları aşağıda maddeler halinde tanımlanmış ve örnekleri verilmiştir. Aşağıda örneklendirilenler en yaygın tercih edilen yöntemler olarak sayılabilir. Bunların dışında genetik algoritmalar ile optimizasyon, deneysel doğrulama teknikleri kullanılarak optimizasyon yöntemleri sıralanabilir. Ancak bu çalışmada bu konular dikkate alınmamıştır.

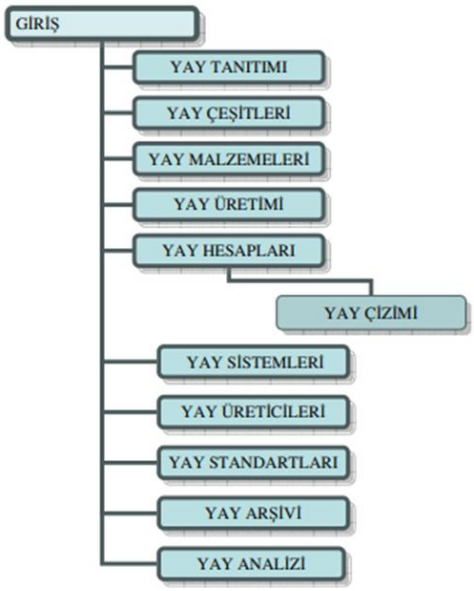
A. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ile optimizasyon



Şekil 5. Sonlu elemanlar analizi işleyiş şeması

Sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyon yaklaşımı için şekil 5 te verilen işleyiş şeması tanımlanmıştır. Bu işleyişe göre tasarlanan özel bir program yardımıyla yay tasarımlarında optimizasyon yapılmıştır. Özellikle sonlu elemanlar analizi ile yapılan tasarımların, klasik yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

B. Parametrik tasarım yöntemlerinin kullanıldığı programlar



Şekil 6. Yaysoft programının ana akış seması

Yay optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde bir araştırmasının da özel bir yazılım olan yaysoft yazılımı ile optimizasyon yaptığı örneği ile karşılaşılmıştır. Şekil 6 da verilen akış şeması tanımlanmıştır. Bu yazılım kullanılarak göre yay tasarımlarında optimizasyon yapılmıştır.

C. Çoklu Karar Verme Yöntemleri ile optimizasyon

Çok fazla sayıda literatürde tanımlanmış karar verme yöntemi vardır. Bunlardan AHP (analitik hiyerarşi süreci) yöntemi kullanılarak yapılan bir yay malzemesi seçimi örneği burada ele alınmıştır.

Tablo 1 de farklı yay malzemelerinin özellikleri verilmiştir. Bu mekanik özelliklerin (doğrusallık, histerisiz ve sürünme gibi) yay malzemesi olarak kullanıldığındaki performanslarına göre 1 den 10'a kadar bağıl puanlanmış performans değerlendirilmelerine yer verilmiştir. Bu puanların yüksekliği o özelliğin istenen seviyeye yakınlığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Tabloda yer alan tüm değerler normal koşullar altında kullanılan malzemeler için, oda sıcaklığındaki değerleridir.

Bu tablo, malzeme seçiminde bir ön eleme şeklinde kullanılmalı, ardından o malzemenin mekanik özellikleri imalatçı firmadan istenmelidir. Olanaklar ölçüsünde tüm bu veriler kontrol edilmelidir. Malzemelerin birbirlerine göre göreceli değerlendirmelerindeki puanlama daha çok imalatçı ve tasarımcıların deneyimine dayanmakta olup burada genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır.

AISI 4140 ve AISI 4340 düşük alaşımlı çelikler yıllardır yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinin yay elemanlarında kullanılmaktadır. Dönüştürücünün boyutlarının büyük olduğu ve sertleştirme ısıl işlemi gerektiğinde çarpılma olasılığı düşük olan bu çelikler oldukça iyi birer çözüm olarak gözükmektedir. Maraging çelikleri de bugün için kullanılmakta olan en popüler, yüksek elastisite modüllü yay malzemeleri arasındadır. Günümüzde paslanmaz çelik grubundaki malzemelere giderek artan bir oranda yönelme söz konusudur. Bu grupta daha çok tercih edilen çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerdir (17-4 PH ve 17-7 PH). Bunlar sertleştirilmeden önce ve sonra rahatça işlenebilir, ardından oldukça düşük sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemler ile çok düşük çarpılma oranına sahiptirler. Bu çeliklerin oksidasyona karşı dirençleri de dönüştürücü tasarımındaki önemli üstünlüklerinden birisidir. Ancak, bu çeliklerin en önemli sakıncası düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları ve diğer malzemelere nispeten maliyetlerinin az miktarda yüksek olmasıdır.

Tablo 1. Farklı bazı yay malzemesi elemanları için malzeme seçim tablosu [8]

MALZEME	Özellikler								Karşılaştırma tablosu								Kullanımı
	Elastiklik Modülü GPa	Akma dayanımı (% 0.2), Mpa	Isıl Genleşme Katsayısı ppm/°C	Yoğunluk, g/cm^3	En yüksek kullanım sıcaklığı, °C	Isıl İletkenliği,watt/m °C	Kopma uzaması, %	Rockwell C sertliği, (HRC)	Isıl İletkenliği	Doğrusallık	Histerisiz	Sürünme	Maliyet	İşlenebilirlik	Sertleşmede çarpılma	Korozyon dayanımı	Kaynak ve lehime uygunluk	
Yüksek Elastik Modüllü Malzemeler																		
AISI 4140 Çeliği	207	1380	11,7	7,84	204	38,9	12	42-45	3	8	8	7	9	5	3	1	5	İyidir ve yaygın kullanılır
AISI 4340 Çeliği	207	1449	11,3	7,84	260	37,4	12	43-46	3	8	8	8	8	5	3	1	5	Çok iyidir ve yaygın kullanılır
18 Ni (250) maraging çelik	186	1691	10,1	8,01	316	20,2	7-10	48-49	2	8	8	7	4	5	8	2	8	İyidir fakat nadir kullanılır
410 paslanmaz çelik	200	966	10,8	7,76	204	24,5	15	39	2	7	7	6	7	4	2	6	2	Nadir kullanılır
630 paslanmaz (17-4 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
631 paslanmaz (17-7 PH) çelik	200	1518	10,3	7,65	204	18,7	6-7	46-48	2	8	8	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
632 paslanmaz (15-7 PH Mo) çelik	200	1518	9,0	7,67	260	15,8	6	47	2	8	8	8	4	6	8	7	7	Çok iyidir fakat nadir kullanılır
S15500 paslanmaz (15-5 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	630 çeliğinin gelişmişidir

D. Optimizasyon Sonuçları

Genel olarak incelenen farklı yay türleri için yapılan optimizasyon uygulamalarında aşağıdaki kazanımlar elde edildiği görülmüştür. Belirlenen optimizasyon sonuçlardan bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ağırlıkta %10–25 oranında azalma,
- Yorulma ömründe %20–30 artış,
- Üretim maliyetlerinde önemli düşüşler,
- Sistem performansında iyileşmeler sağlanmıştır.

IV. SONUÇLAR

Yay tasarımı çok parametreli bir mühendislik problemidir ve bu nedenle bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Matematiksel modelleme, malzeme bilimi ve üretim teknolojileri birlikte değerlendirilmelidir.

Optimizasyon yöntemlerinin kullanımı, tasarım sürecinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak bu yöntemlerin etkin kullanımı için doğru veri ve sınır koşullarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada endüstriyel yay tasarımında kullanılan temel kriterler ve optimizasyon yöntemleri ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre:

- Yay tasarımı çok değişkenli bir optimizasyon problemidir.
- Malzeme seçimi ve üretim kısıtları tasarımın temel belirleyicileridir.
- Optimizasyon teknikleri ile daha verimli ve güvenilir tasarımlar elde edilebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, yapay zekâ destekli tasarım yöntemleri ve akıllı malzeme uygulamaları üzerine yoğunlaşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Ören, O., 2019, Design and manufacturing of a laminated composite leaf spring having non-linear elastic characteristic for automotive industry, Yüksek Lisans tezi
[2] Feyzioğlu, A., 2005, Multiobjective axiomatic and robust design approaches to mechanical spring design, Yüksek Lisans tezi
[3] Ay, H., 2018, Ağır ticari çekici araçların ön süspansiyonunda kullanılan yaprak yay tasarımı, Yüksek Lisans tezi
[4] Bildik, O., 2011, Polimer kompozit yaprak yay tasarımı, Yüksek Lisans tezi
[5] Güven, N., 2011, Bir ticari aracın süspansiyon sistemi için yaprak yay tasarımları geliştirilmesi, Yüksek Lisans tezi
[6] Deveciler, E., 2010, Bilgisayar destekli helisel yay tasarımı ve optimizasyonu, Yüksek Lisans tezi
[7] Gümüş, F., 2006, Bilgisayar destekli helisel yay tasarımı, Yüksek Lisans tezi
[8] Aydemir, B. 2021, Kuvvet Kalibrasyon Rehberi, Tübitak UME, S.75-77, ISBN: 978-605-312-399-6
[9] Rodriguez, E., Paredes, M., Sartor, M., 2004, Optimisation Methods for Spring Design
[10] Paredes, M. et al., 2002, Optimisation Techniques for Industrial Spring Design
[11] Karaduman, A. et al., 2019, Fatigue-based optimisation of diaphragm springs

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Akı Kontrollü Hibrit Rotor Yapısına Sahip Eksenel Akılı BLDC Motorun Performans Analizi

Sadullah Esmer[a], Nihat Daldal[a], Fatih Korkmaz[b]*

[a]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye.
[b]Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çankırı/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** sadullahesmer@ibu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada akı kontrollü hibrit rotor yapısına sahip eksenel akılı BLDC motorun performansı analiz edilmiştir. Analizler sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS Motor-CAD'de yapılmıştır. Mıknatıs ve sargıdan oluşan hibrit rotor yapısı sayesinde rotor uyartım alanı kontrol edilebilmektedir. Çalışmada sadece mıknatıs kaynaklı rotor alanı, %30 rotor alanı artırımı ve %30 rotor alanı azaltımı olmak üzere üç durum değerlendirilmiştir. Her durumda motorun performansı analiz edilmiştir. Motor, rotor alan artırımı ile yüksek tork, rotor alan azaltımı ile yüksek hız üretmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hibrit rotor yapısına sahip eksenel akılı BLDC motorun akı kontrolü sayesinde daha geniş çalışma aralığında yüksek verime ulaştığı görülmüştür. Ayrıca geleneksel rotor yapısına sahip motorlara göre daha yüksek tork kapasitesi ve daha yüksek hız kapasitesine sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Akı Kontrolü, Eksenel Akılı BLDC Motor, Hibrit Rotor Yapısı, Sonlu Elemanlar Yöntemi.*

Performance Analysis of Axial Flux BLDC Motor with Flux-Controlled Hybrid Rotor Structure

ABSTRACT

In this study, the performance of an axial-flux BLDC motor with a flux-controlled hybrid rotor structure has been analyzed. The analyses have been performed using the finite element method (FEM) in ANSYS Motor-CAD. The rotor excitation field can be controlled thanks to the hybrid rotor structure consisting of magnets and windings. In this study, three cases have been evaluated: the rotor field generated only by magnets, a 30% increase in the rotor field, and a 30% decrease in the rotor field. The performance of the motor has been analyzed for each case. The motor produced high torque with an increased rotor flux and high speed with a reduced rotor flux. When the results have been examined, it has been seen that the axial-flux BLDC motor with a hybrid rotor structure achieves high efficiency over a wider operating range due to flux control. Additionally, it has been proven that it has higher torque capacity and higher speed capacity compared to motors with a traditional rotor structure.

Keywords: *Flux Control, Axial-Flux BLDC Motor, Hybrid Rotor Structure, Finite Element Method.*

I. INTRODUCTION

Electric motors play a critical role in electric vehicle technology, which has been developing rapidly, especially in recent years. The traction systems used in electric vehicles must be capable of delivering high torque during acceleration and hill starts, while also ensuring stable operation across a wide speed range under driving conditions that require high speed. These variable operating requirements necessitate that the motor be able to operate flexibly at different operating points. Brushless DC (BLDC) motors are widely used in electric vehicle applications due to their advantages, such as high efficiency, high power density, and low maintenance requirements. Additionally, axial-flux motor designs stand out in this field due to their compact designs and high torque density [1], [2].

In traditional BLDC motors, the fact that the rotor flux is constantly generated by permanent magnets limits the motor's ability to operate efficiently, particularly over a wide speed range. The ability to control the rotor magnetic field offers a significant advantage in ensuring that the high torque and high speed requirements of electric vehicle applications can be met using the same motor design [3]. In the hybrid rotor designs developed for this purpose, the magnetic flux can be increased or decreased depending on operating conditions by using rotor auxiliary windings in combination with permanent magnets. This allows for high torque output at low speeds, while field weakening at high speeds enables a wider operating range. There are some studies in the literature related to hybrid rotor structures. Salim et al. investigated the mathematical modeling of Hybrid Excited Synchronous Machines (HESM), which utilize both permanent magnets and excitation windings, and the validation of these models using experimental data. Improvements have been observed in both the speed range and efficiency [4]. Yang et al. investigated the effects of the excitation current on electromagnetic vibration and noise in hybrid excited synchronous motors with rotor magnetic shunts. In the study, they analyzed how flux control achieved by varying the excitation current affects the radial electromagnetic forces on the stator teeth and the resulting acoustic noise levels [5]. Linus et al. investigated the dynamic performance and controllability of a hybrid rotor synchronous machine with a high aspect ratio. In their study, they analyzed the effects of this extreme aspect ratio on the motor's torque response, speed stability, and high-efficiency operating regions [6]. Ali et al. designed a motor with a dual-stator and hybrid-rotor configuration. This design enables a dual-mode structure that delivers high torque at low speeds and high efficiency at high speeds. Test results have demonstrated that this design offers a wide operating range for variable speed applications and high torque density, as well as fault tolerance capabilities [7]. Krishnan et al. compared designs of permanent magnet BLDC motors with radial flux and axial flux at different power levels. The analyses revealed that axial flux motors offer a more compact design and higher power density and demonstrated that they outperform radial flux motors in terms of overall performance [8]. Ahmed et al. developed a hybrid synchronous motor for washing machine applications and designed a dual-mode system that delivers high torque at low speeds and efficient operation at high speeds. The results of the study demonstrated that dynamic excitation control enhances energy efficiency and extends system lifespan [9].

In this study, the performance of an axial flux BLDC motor with a flux-controlled hybrid rotor structure was analyzed using the FEM, and the effects of different flux levels on the motor characteristics were investigated. The auxiliary excitation windings in the rotor can be controlled by energizing them in a controlled manner through contactless power transfer, allowing the rotor's excitation field to be controlled. Consequently, by adjusting the rotor excitation levels, the performance of the axial flux BLDC motor is improved. In this study, motor performance has been analyzed for three different flux levels. According to the results obtained, it has been observed that the adjustable rotor excitation field enables the axial flux BLDC motor to operate over a wider speed range and within a wider high-efficiency region.

II. MATERIALS AND METHODS

Axial flux BLDC motors have become one of the most notable motor types in recent years due to their higher torque density, shorter axial length, and more compact design compared to radial flux motors. The disk-shaped rotor and stator design enables higher power density and provides a volume advantage [10]. Additionally, these motors offer more effective cooling due to their large surface area and are widely preferred in systems requiring high efficiency and dynamic performance [11]. Figure 1 shows the rotor and stator of an axial flux BLDC motor.

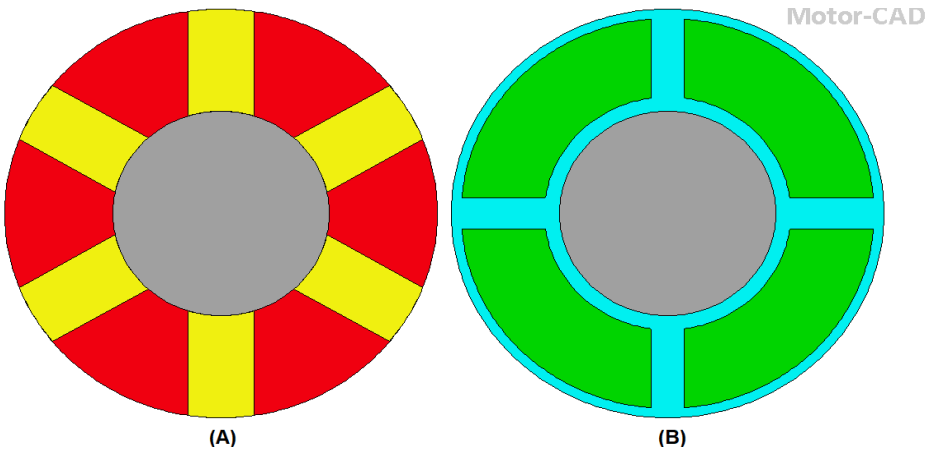


Figure 1. Design of the Stator (A) and Rotor (B) of an Axial-Flux BLDC Motor

In this study, the performance of an axial flux BLDC motor with a hybrid rotor structure has been analyzed using the FEM under three different rotor flux levels. The hybrid rotor design has been developed through the integration of permanent magnets, which provide the main magnetic field, and controllable excitation windings, which allow for the modulation of the flux. As a methodological approach, the motor's torque, efficiency, and speed values have been examined under low, medium, and high flux densities. Table 1 shows the parameters for the three different conditions analyzed.

Table 1. Parameters of the Analyzed Axial-Flux BLDC Motor for Three Different Conditions

Parameters	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Flux condition	Base Flux	Flux Reduced by 30%	Flux Increased by 30%
Rotor Magnetic Flux Density	0.440 T	0.308 T	0.572 T
Flux Source	Permanent Magnet Only	Permanent Magnet and Auxiliary Winding	Permanent Magnet and Auxiliary Winding

The hybrid rotor structure is an advanced rotor topology that combines the primary magnetic field provided by permanent magnets with the controllable flux-generating capability of external auxiliary windings. In this configuration, a wireless power transfer (WPT) based energy transmission system is utilized to meet the excitation requirement on the rotor. The alternating magnetic field generated in the transmitter winding on the stator induces a voltage in the receiver winding on the rotor side across the air gap, thereby enabling contactless energy transfer. The captured energy feeds the auxiliary windings through rectification and filtering circuits, allowing for dynamic control of the rotor flux. Consequently, the high-efficiency advantage offered by permanent magnets is preserved while achieving flux weakening and adaptive control capabilities across a wide speed range. The axial flux hybrid rotor structure is illustrated in Figure 2.

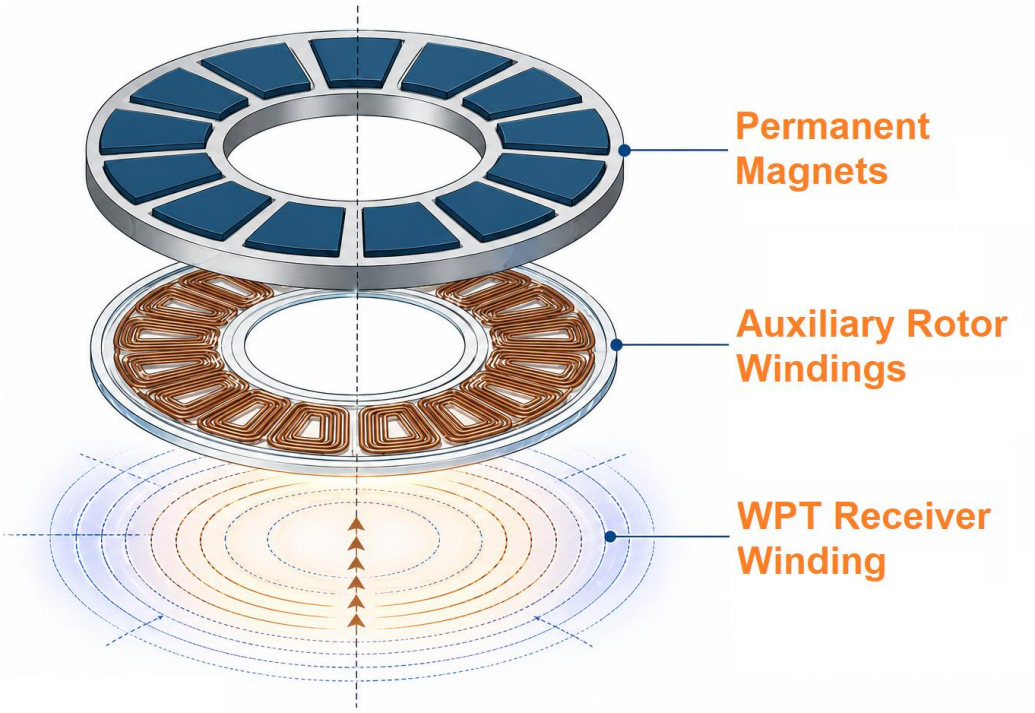


Figure 2. Illustration of an Axial Flux Hybrid Rotor Structure

A. Electromagnetic Design

This section addresses the electromagnetic design parameters of the axial flux hybrid rotor BLDC motor. In the design approach, the magnetic circuit structure determining the operating principle of the motor and the fundamental electromagnetic relations are taken into consideration. Furthermore, geometric configuration and material selection, which directly affect the motor performance, are evaluated as the core elements of the design process. The baseline design and drive parameters of the motor are provided in Table 2.

Table 2. Basic Parameters of an Axial Flux BLDC Motor

Parameters	Values	Parameters	Values
Number of stator slots	6	Max Power	500 W
Number of poles	4	Rated Torque	1.65 Nm
Driver Voltage	32 V	Rated Speed	2500 rpm
Driver Current	16 A	Type of Magnet	Ferrite

The axial flux BLDC motor with the designated design parameters has been numerically analyzed utilizing the FEM based Ansys Motor-CAD software environment. In these analysis processes, rather than employing methods that would increase physical complexity, such as integrating additional windings into the rotor structure, the material and geometric parameters of the permanent magnets were directly altered to investigate the fundamental electromagnetic potential of the system. Consequently, the base flux condition, flux weakening condition, and flux boosting condition scenarios have been manually controlled and simulated at the desired flux levels. This methodology allowed the study to focus directly on the electromagnetic performance analysis of the motor, rather than the complex physical and mechanical design processes.

B. FEM Results

B.1. Base Flux Condition

Initially, analyses have been performed under the base flux condition to determine the nominal operating limits of the axial flux brushless DC motor. In this scenario, where permanent magnets were present and no flux intervention has been applied to the system, simulations were conducted utilizing the FEM. As a result of the electromagnetic analyses, the obtained performance values of the motor are presented in Table 3."

Table 3. Performance Values of an Axial Flux BLDC Motor Under Base Flux Condition

Parameters	Values
Rotor Magnetic Flux Density	0.440 T
Mean Air-Gap Flux Density	0.32 T
Nominal Speed	2500 rpm
Maximum Torque	1.65 Nm
Maximum Speed	3800 rpm

When the base flux condition parameters presented in Table 3 are examined, the fundamental operating limits of the axial flux BLDC motor under nominal magnet characteristics—without any external flux intervention—are observed. In this scenario, the motor can produce a maximum torque of 1.65 Nm, and the nominal operating speed is calculated as 2500 rpm. Since the output power balance of the system is maintained, the maximum speed limit reaches 3800 rpm as the torque value decreases. The efficiency map of the motor based on the torque and speed limits under these operating conditions is shown in Figure 3.

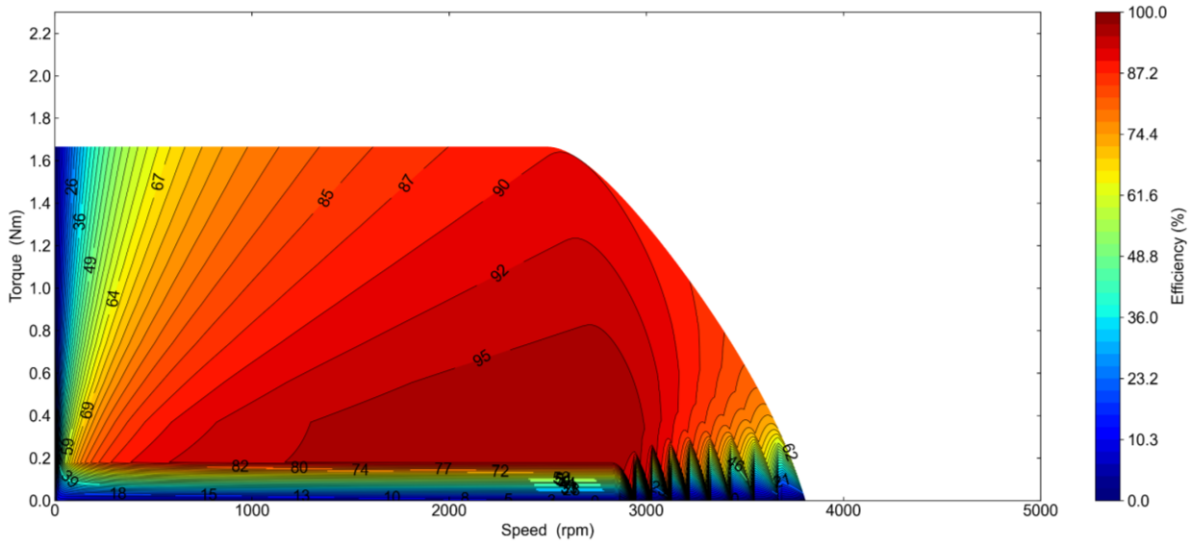


Figure 3. Efficiency map of an Axial Flux BLDC Motor under base flux condition

B.2. Flux Weakening Condition

Flux weakening analyses have been performed to investigate the operational flexibility of the axial flux BLDC motor in high-speed regions and its capability to exceed nominal speed limits. In this scenario, to avoid the hardware complexity introduced by adding auxiliary windings to the rotor, the internal magnetic flux of the motor has been reduced by manually manipulating the permanent magnet parameters. The flux-weakening strategy weakens the back electromotive force generated in the motor, allowing current to flow through the windings at higher speeds, and thus enabling the motor to operate in an extended speed range. As a result of the electromagnetic simulations, the performance values showing the effects of the reduced flux level on the motor's torque capacity, nominal operating speed, and maximum speed limit are presented in Table 4.

Table 4. Performance of an Axial Flux BLDC Motor Under Flux Weakening Condition

Parameters	**Values**
Rotor Magnetic Flux Density	0.308 T
Mean Air-Gap Flux Density	0.23 T
Nominal Speed	3485 rpm
Maximum Torque	1.16 Nm
Maximum Speed	6300 rpm

An examination of Table 4 clearly demonstrates the direct impact of the flux weakening scenario on the high-speed capability of the motor. Compared to the base flux condition, the net air-gap flux is reduced under the flux weakening condition, which consequently decreases the back EMF amplitude induced in the motor. Due to the input voltage constraint, lowering the back EMF allows higher frequency currents to flow through the windings; as a result, the maximum operating speed, which is 3800 rpm in the base flux condition, increases in this scenario, extending the upper speed limit of the motor to approximately 6300 rpm. However, since the total electrical power input of the motor is kept constant, this expansion of the speed range leads to a reduction in torque capacity. The efficiency map exhibited by the motor under these operating conditions, depending on the torque and speed limits, is illustrated in Figure 4.

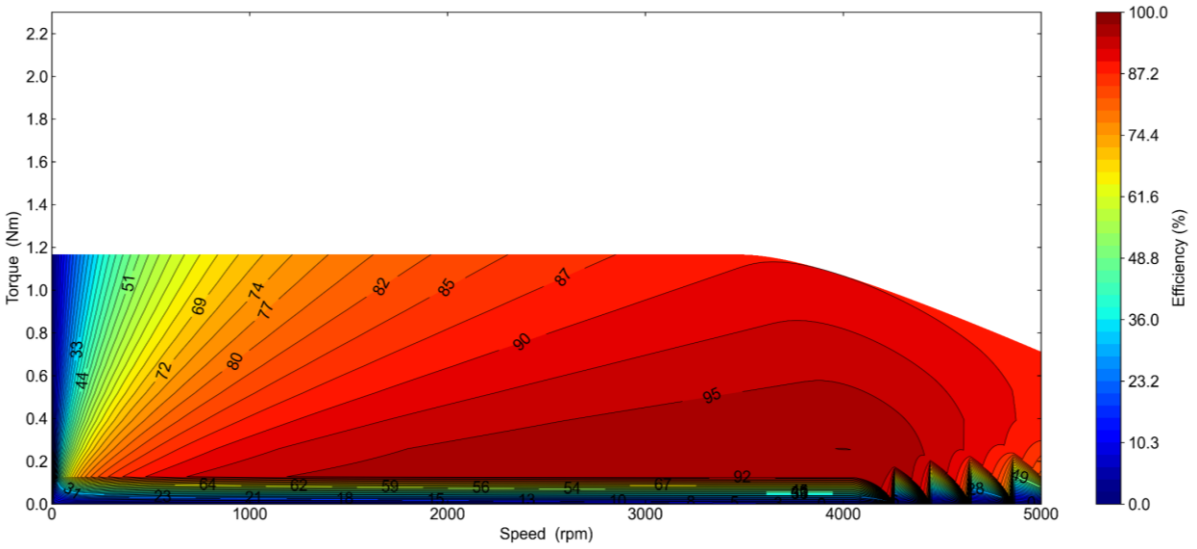


Figure 4. Efficiency map of an Axial-Flux BLDC motor under flux weakening conditions

B.3. Flux Boosting Condition

The flux-boosting scenario has been executed to maximize the torque capability of the axial flux BLDC motor, particularly during start-up and under heavy load conditions requiring low speeds. Similar to the previous scenarios, to avoid the design constraints introduced by additional physical rotor windings, the internal magnetic flux of the motor has been enhanced by manually manipulating the parameters of the permanent magnets located on the rotor. The flux-boosting strategy aims to maximize the electromagnetic torque production per unit current by increasing the total air-gap flux density. Consequently, the performance values demonstrating the effects of the enhanced excitation flux on the torque capacity, nominal operating speed, and maximum speed of the motor—obtained through FEM analyses—are presented in Table 5.

Table 5. Performance of an Axial Flux BLDC Motor under flux boosting conditions

Parameters	**Values**
Rotor Magnetic Flux Density	0.572 T
Mean Air-Gap Flux Density	0.42 T
Nominal Speed	1960 rpm
Maximum Torque	2.14 Nm
Maximum Speed	2800 rpm

An evaluation of the results in Table 5 clearly demonstrates the positive impact of the flux-boosting scenario on the torque production capability of the motor. The strengthening of the rotor excitation field increases the total air-gap magnetic flux density. Under these conditions, where the current and voltage inputs are kept constant, the electromagnetic torque generated per unit current through the windings is enhanced. Consequently, the torque produced by the motor reaches a value of 2.14 Nm. However, due to the mechanical power balance constraints of the motor, this significant increase in torque capability leads to a reduction in the nominal speed limits. This behavior stems from the premature rise of the back electromotive force (back-EMF) and exhibits a characteristic that is the exact opposite of the flux-weakening scenario, which expands the speed range. Consequently, it is observed that the flux-boosting strategy is highly favorable for the motor, particularly during start-up, acceleration processes, and heavy-load regimes requiring low-speed and high-torque operations. The efficiency map exhibited by the motor under these operating conditions is illustrated in Figure 5.

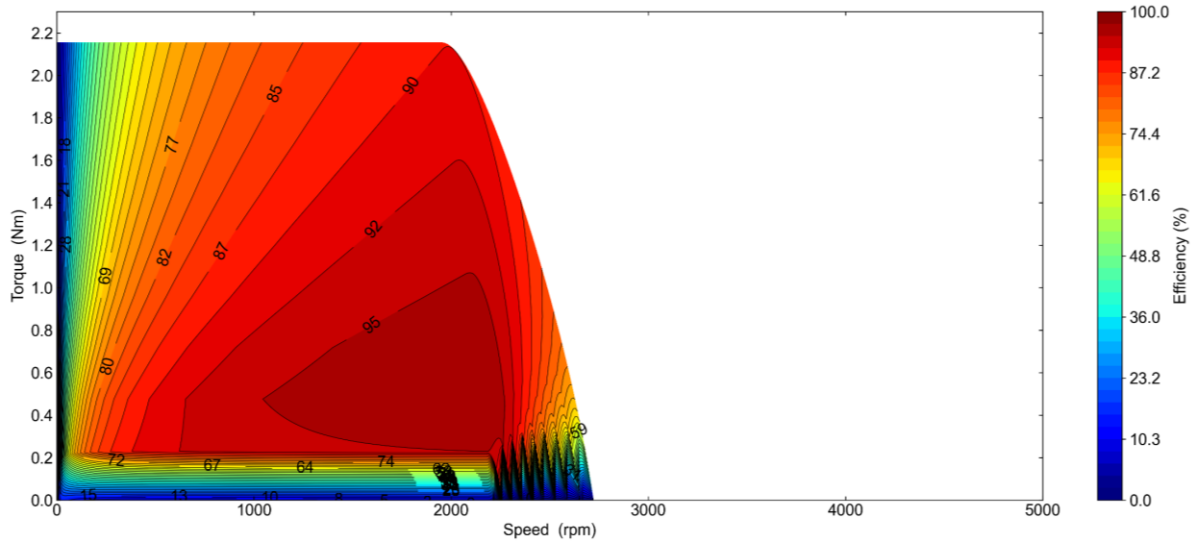


Figure 5. Efficiency Map of an Axial-Flux BLDC Motor Under Flux Boosting Conditions

B.4. Comparison of Different Flux Conditions

In this study, the electromagnetic performance of the axial flux BLDC motor with a hybrid rotor has been investigated using the FEM under three distinct scenarios: the base flux condition, where only the permanent magnets are active; the flux weakening condition, in which the air-gap flux is reduced by 30%; and the flux boosting condition, where the flux is increased by 30%. The numerical analyses and the resulting efficiency maps reveal that the dynamic control of the rotor excitation flux plays a decisive role in defining the motor characteristics. While the flux boosting strategy maximizes the high torque production critical for start-up, acceleration, and heavy load conditions by increasing the total air-gap flux density, the flux weakening strategy significantly extends the stable operating and maximum speed limits of the motor by weakening the back EMF. The efficiency maps of the motor across these three distinct states are illustrated in Figure 6. Furthermore, to clearly observe the operational flexibility offered by the design and the performance variations among the scenarios, the fundamental electromagnetic parameters obtained from the simulations are collectively compared in Table 6.

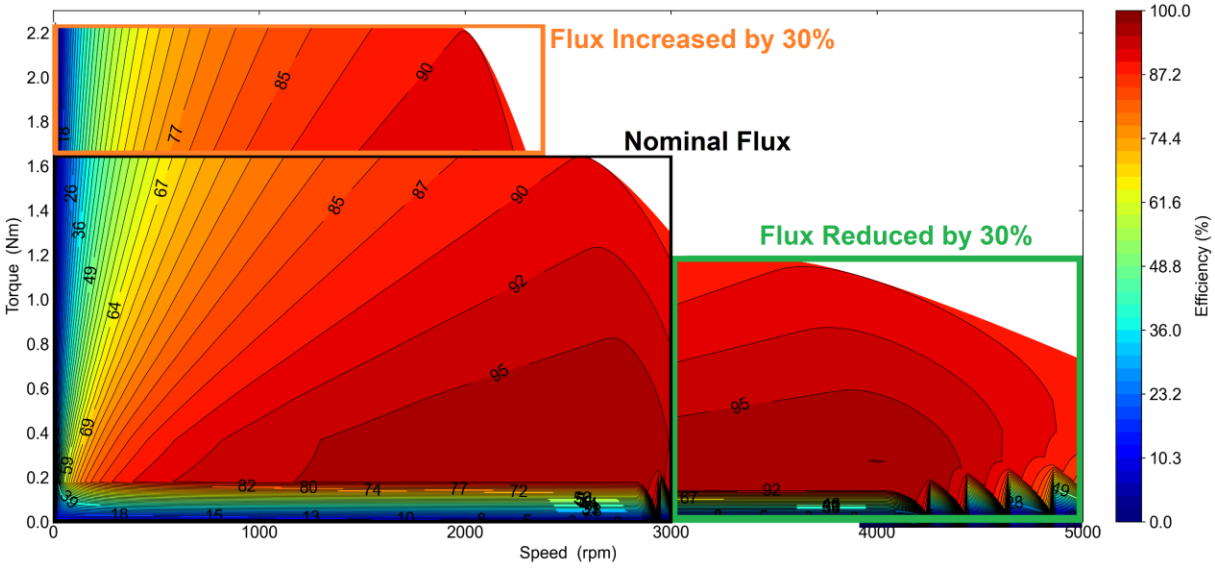


Figure 6. Efficiency map of an Axial Flux BLDC Motor for all flux conditions

Table 6. Performance of an Axial Flux BLDC Motor for all flux conditions

Parameters	**Flux Reduced by 30%**	**Base Flux**	**Flux Increased by 30%**
Rotor Magnetic Flux Density	0.308 T	0.440 T	0.572 T
Mean Air-Gap Flux Density	0.23 T	0.32 T	0.42 T
Maximum Torque	1.16 Nm	1.65 Nm	2.14 Nm
Nominal Speed	3485 rpm	2500 rpm	1960 rpm
Maximum Speed	6300 rpm	3800 rpm	2800 rpm
Flux Source	Permanent Magnet and Auxiliary Winding	Permanent Magnet Only	Permanent Magnet and Auxiliary Winding

Figure 6 and Table 6 demonstrate that the operating characteristics of the motor can be effectively manipulated solely by altering the rotor magnetic field, while keeping the electrical power inputs constant. Unlike conventional permanent magnet motors restricted to a single torque-speed curve, the proposed rotor design introduces operational flexibility by enabling adjustable magnetic flux levels. In the flux boosting scenario, increasing the flux density yields higher magnetic torque at low speeds, reaching a maximum torque of 2.14 Nm. This 30% increase relative to the base flux condition is ideal for startup and heavy-load conditions. However, due to mechanical power constraints and a rapidly rising back-EMF, the maximum speed in this case decreases to 2800 rpm. Conversely, in the flux weakening scenario required for high-speed operation beyond the nominal range, the air-gap flux density is reduced by manipulating the rotor magnet parameters. This strategy suppresses the back-EMF amplitude, reducing the torque capability to 1.16 Nm while substantially extending the speed range. Consequently, the maximum speed increases by 65.7%, rising from 3800 rpm in the base flux condition to 6300 rpm. Furthermore, the efficiency maps indicate that the high-efficiency area shifts across different speeds and torque coordinates depending on the flux density. This capability ensures that the motor consistently operates at its optimum efficiency point under variable operating conditions.

III. RESULTS

In this study, a FEM based performance analysis of an axial-flux BLDC motor with a flux-controlled hybrid rotor structure has been performed under base flux condition, flux weakening condition, and flux boosting condition scenarios. Detailed analyses have been performed by modifying the rotor excitation field to change the flux density from the base flux condition of 0.440 T to values of 0.308 T and 0.572 T. Using the flux boosting approach, the maximum torque capacity of the motor has been increased from 1.65 Nm to 2.14 Nm, achieving a 29.7% increase in torque density without increasing the mechanical volume. Moreover, thanks to the flux weakening strategy, the back EMF has been reduced, allowing the motor to reach a maximum speed of approximately 6,300 rpm, a 65% increase from 3,800 rpm. Furthermore, it has been numerically demonstrated that high efficiency regions can be shifted to different coordinates on the torque-speed plane through flux control, and that the system can be adapted to variable driving cycles.

IV. DISCUSSION

The findings demonstrate that dynamic flux control in axial-flux BLDC motors successfully overcomes the limitations of traditional permanent-magnet motors, which are constrained to a single operating curve. In the proposed design, the ability to adjust the air-gap flux density has enabled the motor to achieve both high torque and high-speed capabilities within a single geometry. The torque increase achieved in the flux boosting condition offers an ideal boost, particularly for the acceleration and climbing stages of electric vehicles, while in the flux weakening condition, the voltage constraint has been shifted by attenuating the back EMF, resulting in a wide high-speed operating region with increased maximum speed. Furthermore, it has been demonstrated that high efficiency can be maintained even under variable driving cycles thanks to the ability to shift high-efficiency operating regions.

V. CONCLUSIONS

In this study, it has been proven that the flux-controlled hybrid rotor structure successfully expands the operating limits of axial flux BLDC motors. The results show that flux control enables a 29.7% increase in torque and a 65.7% increase in speed, creating a wider operating range. The flexibility offered by this design and the ability to manipulate the efficiency region provide a highly efficient and compact alternative for electric vehicle applications with variable load cycles.

REFERENCES

[1] T. Nguyen, J. Y. Lee, and J. H. Lee, "High Power Density Axial-Flux Permanent Magnet Motor for Electric Bike Application," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 61621–61629, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3281744.

[2] Y. Zhou *et al.*, "Design of Axial-Flux Permanent Magnet Motors with High Torque Density and Low Thermal Raise for Electric Motorcycle," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 72, no. 1, pp. 734–744, 2025, doi: 10.1109/TIE.2024.3401198.

[3] S. Hlioui *et al.*, "Hybrid Excited Synchronous Machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3079228.

[4] S. Asfirane, S. Hlioui, Y. Amara, and M. Gabsi, "Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation," *Mathematical and Computational Applications 2019, Vol. 24, Page 34*, vol. 24, no. 2, p. 34, Mar. 2019, doi: 10.3390/MCA24020034.

[5] Q. Yang, L. Pang, H. Shen, H. Qin, and C. Zhao, "Influence of excitation current on electromagnetic vibration and noise of rotor magnetic shunt hybrid excitation synchronous motor," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 476–485, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.05.227.

[6] L. U. Anih, E. O. Agbachi, and E. S. Obe, "Dynamic Performance of a Hybrid Synchronous Machine with Ultra-High XD/XQ Ratio," *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2023, doi: 10.53982/AJERD.2023.0601.01-J.

[7] S. Ali, Q. Ali, H. M. Munir, and H. A. Zidan, "A dual-mode dual-stator hybrid rotor synchronous and vernier machine for variable speed applications," *Scientific Reports 2026 16:1*, vol. 16, no. 1, pp. 10315-, Feb. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-40821-y.

[8] K. Sitapati and R. Krishnan, "Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1219–1226, Sep. 2001, doi: 10.1109/28.952495.

[9] S. Ahmed, Q. Ali, G. J. Sirewal, K. Kumar, and G. Choi, "Hybrid Brushless Wound-Rotor Synchronous Machine with Dual-Mode Operation for Washing Machine Applications," *Machines 2025, Vol. 13, Page 342*, vol. 13, no. 5, p. 342, Apr. 2025, doi: 10.3390/MACHINES13050342.

[10] E. Yeşilbağ, Y. Ertuğrul, L. ErgenE, E. Yeşilbağ, Y. Ertuğrul, and L. Ergene, "Axial flux PM BLDC motor design methodology and comparison with a radial flux PM BLDC motor," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 3455–3467, Jan. 2017, doi: 10.3906/elk-1611-23.

[11] Z. Hao, Y. Ma, P. Wang, G. Luo, and Y. Chen, "A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques," *Machines 2022, Vol. 10, Page 1178*, vol. 10, no. 12, p. 1178, Dec. 2022, doi: 10.3390/MACHINES10121178.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Yenilenebilir Enerji Entegreli İki Alanlı Yük Frekans Kontrolünde Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Eren Özcan, Mithat Önder*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, Turkey
*** Corresponding author's e-mail address:** 223403051@ogrenci.ibu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları entegreli iki alanlı bir yük frekans kontrol (LFC) sistemi incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine artan entegrasyonu sisteme belirsizlikler kazandırmakta ve frekans kontrolünü daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle LFC sistemlerinde kontrolör parametrelerinin etkin şekilde optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda kontrolör parametreleri Genetik Algoritma (GA), Grey Wolf Optimization (GWO), Aquila Optimization (AO) ve Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA) kullanılarak optimize edilmiştir. Tüm algoritmalar aynı sistem modeli ve aynı parametre sınırları altında değerlendirilmiş, performans kriteri olarak Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) kullanılmıştır. Önerilen sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve farklı yük bozucu etki koşulları altında dinamik davranışı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları tüm algoritmaların sistem kararlılığını artırdığını ve frekans sapmalarını azalttığını göstermiştir. Ancak CFOA algoritması özellikle yük bozucu etki koşulları altında genel olarak daha düşük ITAE değerleri ve daha iyi dinamik performans sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar CFOA algoritmasının yenilenebilir enerji entegreli LFC sistemlerinde kontrolör parametre optimizasyonu için etkili ve güçlü bir optimizasyon yöntemi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yük frekans kontrolü, Yenilenebilir enerji entegrasyonu, Genetik Algoritma, Meta-sezgisel optimizasyon, ITAE.*

Comparative Analysis of Metaheuristic Optimization Algorithms In Two-Area Load Frequency Control With Renewable Energy Integration

ABSTRACT

In this study, a renewable energy integrated two-area load frequency control (LFC) system is investigated. The increasing penetration of renewable energy sources introduces uncertainties into the power system and makes frequency regulation more challenging. Therefore, effective optimization of controller parameters is of great importance in LFC applications. In this context, controller parameters are optimized using Genetic Algorithm (GA), Grey Wolf Optimization (GWO), Aquila Optimization (AO), and Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA). All algorithms are evaluated under the same system model and identical parameter boundaries, while the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) is used as the performance criterion. The proposed system is modeled in the MATLAB/Simulink environment and its dynamic behavior is analyzed under different load disturbance conditions. Simulation results show that all algorithms improve system stability and reduce frequency deviations. However, the CFOA algorithm generally achieves lower ITAE values and provides better dynamic performance, especially under load disturbance conditions. The obtained results demonstrate that CFOA is an effective and robust optimization method for controller parameter optimization in renewable energy integrated LFC systems.

Keywords: *Load frequency control, Renewable energy integration, Genetic Algorithm, Metaheuristic optimization, ITAE.*

I. INTRODUCTİON

Load Frequency Control (LFC), also known as Automatic Generation Control (AGC), is a secondary control mechanism used in interconnected power systems to maintain the system frequency at its nominal value and regulate tie-line power exchanges between different control areas. In multi-area power systems, any imbalance between power generation and load demand results in frequency deviations and oscillations in tie-line power flows. The LFC mechanism operates through the Area Control Error, which combines frequency deviation and tie-line power variation to adjust turbine governor inputs and restore system balance [1]. In this way, load variations can be compensated in real time, ensuring stable and synchronized operation of large-scale power systems.

The increasing integration of renewable energy sources into power systems has made frequency control more complex in modern power networks. Although wind and photovoltaic (PV) systems provide environmental and economic benefits, their intermittent and stochastic generation characteristics introduce additional operational uncertainties [2]. Sudden and unpredictable variations in renewable power generation may increase frequency deviations and complicate the control process. If these deviations are not properly regulated, they may propagate throughout the interconnected system, leading to voltage instability and threatening the reliability of critical equipment [3], [4].

Various controller structures have been proposed in the literature to enhance the performance of LFC systems. Conventional Proportional–Integral–Derivative (PID) controllers have been widely used due to their simple structure and ease of implementation [5], [6]. However, the fixed-parameter structure of traditional PID controllers may limit their performance in nonlinear and highly dynamic systems. To overcome these limitations, advanced control approaches such as fractional-order PI (FOPI) and fractional-order PID (FOPID) controllers have been developed to improve transient performance [2], [3].

In addition, various meta-heuristic optimization algorithms have been widely applied in the literature to determine optimal controller parameters. In particular, Genetic Algorithm (GA) [7], Grey Wolf Optimization (GWO) [8], Aquila Optimization (AO) [9], and Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA) [10] have demonstrated strong global search capabilities and successful performance in solving complex optimization problems. Among these algorithms, CFOA is a recently developed human behavior-based optimization technique inspired by fishermen's fish-catching strategies. The algorithm provides an effective balance between exploration and exploitation phases, enabling efficient searching in nonlinear and multidimensional optimization problems.

In this study, a comparative performance analysis of Genetic Algorithm (GA), Grey Wolf Optimization (GWO), Aquila Optimization (AO), and Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA) is conducted to determine optimal controller parameters for a renewable energy integrated two-area LFC system. Unlike many existing studies focusing on a single optimization technique, this study comparatively evaluates multiple meta-heuristic algorithms under identical system conditions and parameter boundaries using the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) as the performance criterion. Furthermore, different load disturbance scenarios are applied to the system in order to investigate the robustness and dynamic performance of the algorithms under varying operating conditions. The algorithms are compared not only in terms of minimum ITAE value but also with respect to computational time, damping performance, and settling characteristics. In this way, the balance between solution quality and computational cost is analyzed, and the most suitable optimization approach for renewable energy integrated LFC applications is investigated.

II. MATERIAL AND METHOD

A. System Model

In this study, a two-area load frequency control (LFC) system integrated with renewable energy sources is considered. Load variations in power systems disturb the balance between generation and consumption, leading to frequency deviations. Therefore, the LFC mechanism is used to maintain the system frequency at its nominal value [1].

In multi-area power systems, frequency control is achieved using the Area Control Error (ACE) signal. The ACE signal is defined as follows [2]:

$$ACEi = Bi\Delta fi + \Delta Ptie,i \quad (1)$$

where Bi is the frequency bias coefficient, Δfi is the frequency deviation of the i-th area, and ΔPtie,i is the tie-line power change [2].

The system model consists of a two-area thermal power system. Each area includes governor, turbine, and power system dynamics. The areas are connected through a tie-line. This model is widely used in LFC studies [2].

To represent renewable energy integration, wind and photovoltaic (PV) generation units are included in the system. These sources introduce uncertainties due to their intermittent nature [3].

The system is modeled in MATLAB/Simulink, and its dynamic behavior is analyzed. Frequency deviations (Δf1, Δf2) and tie-line power deviation (ΔPtie) are used as performance indicators.

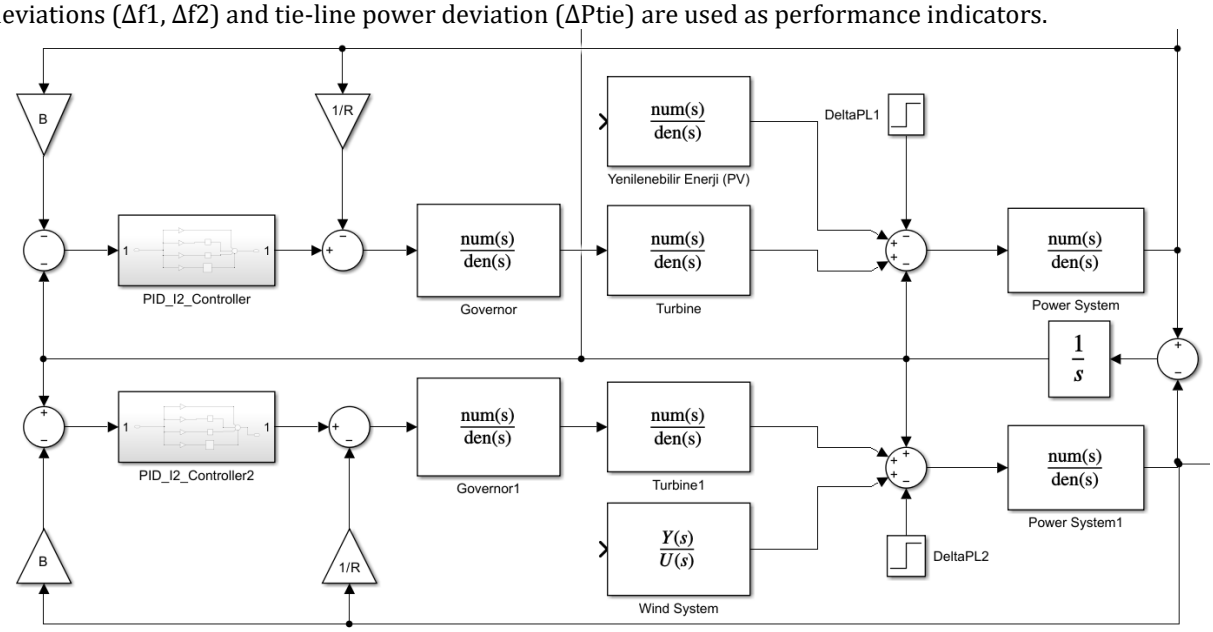


Figure 1. Simulink model of the two-area load frequency control (LFC) system with integrated renewable energy sources [1]

The system parameters used in the simulation are selected based on commonly used values in literature and are given in Table 1.

Table 1. Power system parameter values [1]

Parameter	**Value**	**Parameter**	**Value**
Kpv	1	τpv	1.3
Kwt	1	τwt	1.5
Kps	120	τps	20
Tg	0.08	Tt	0.3
B	0.425	R	2.4

In this study, Genetic Algorithm (GA), Grey Wolf Optimization (GWO), Aquila Optimization (AO), and Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA) are used to optimize controller parameters.

GA is a population-based optimization method inspired by natural selection and genetic evolution. GWO is based on the social hierarchy and hunting behavior of grey wolves. AO models eagle hunting strategies and balances exploration and exploitation phases. CFOA is inspired by fishermen's fish-catching behavior and performs effective exploration and exploitation in the search space.

These algorithms are effective for solving nonlinear and complex optimization problems [4]–[7].

B. Performance Criterion

The performance of the algorithms is evaluated using the ITAE criterion [2]:

$$ITAE = \int_0^T t\,|\Delta f(t)|\,dt \quad (2)$$

The controller parameters are optimized to minimize the ITAE value.

III. RESULTS

A. *Convergence Characteristics*

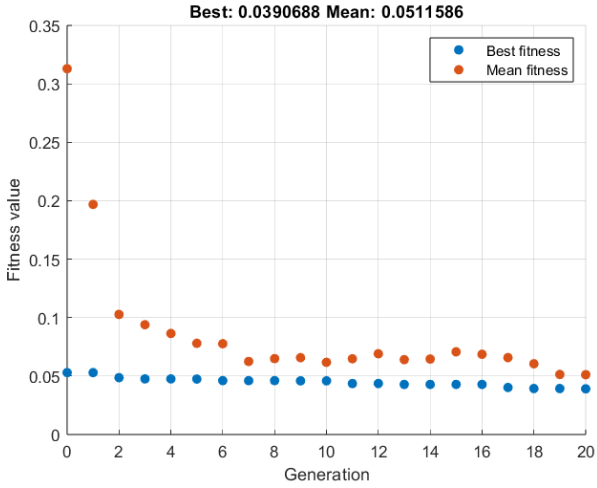


Figure 2. Convergence curve of the Genetic Algorithm

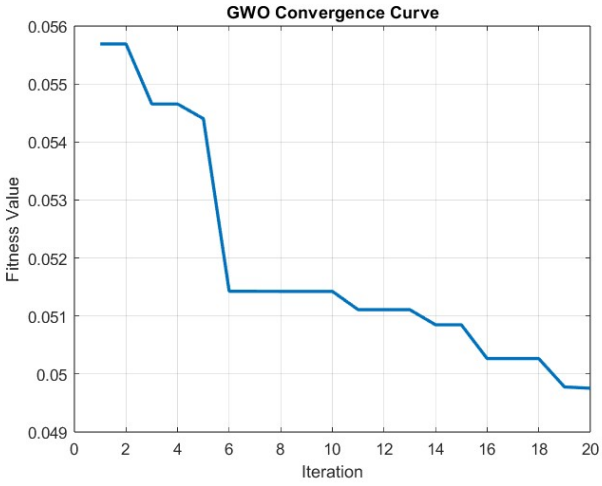


Figure 3. Convergence curve of the Grey Wolf Optimization algorithm

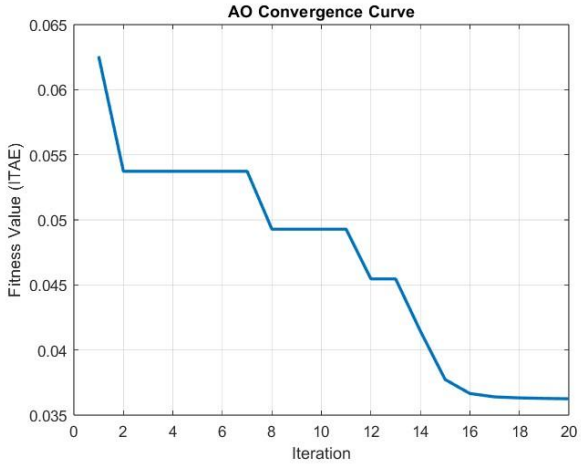


Figure 4. Convergence curve of the Aquila Optimization algorithm

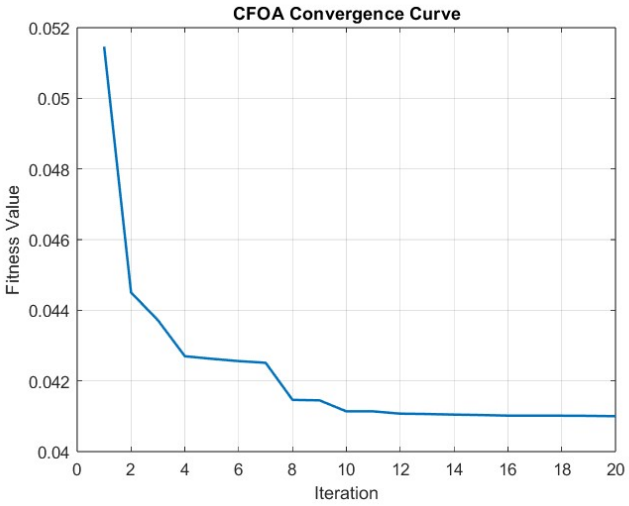


Figure 5. Convergence curve of the Catch Fish Optimization Algorithm

B. *Frequency Response Analysis*

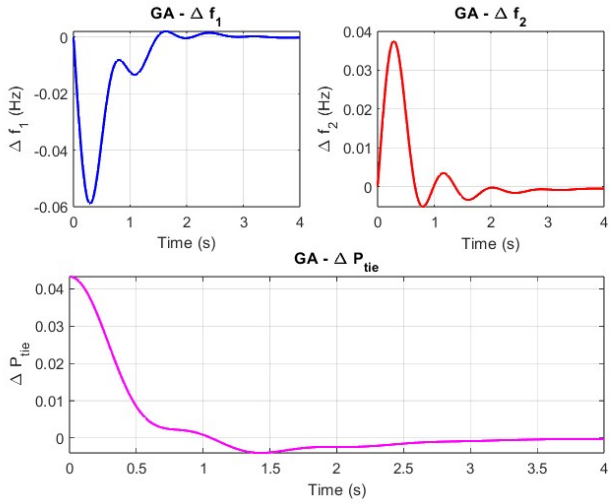


Figure 6. Dynamic responses of the system using GA optimized controller.

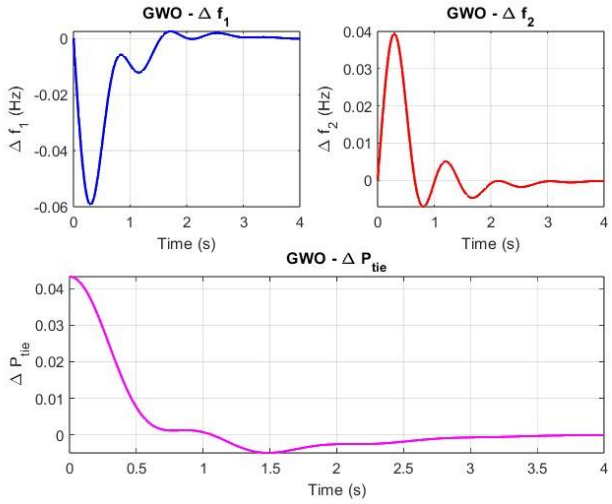


Figure 7. Dynamic responses of the system using GWO optimized controller.

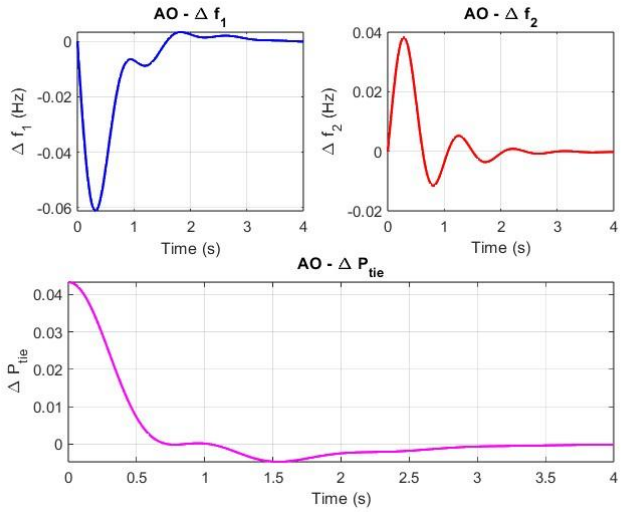


Figure 8. Dynamic responses of the system using AO optimized controller.

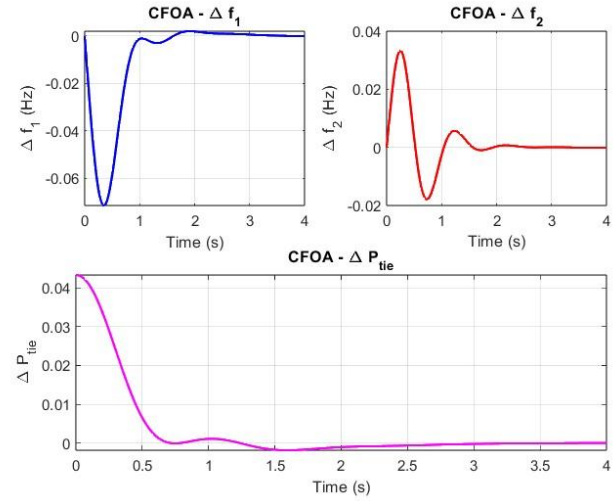


Figure 9. Dynamic responses of the system using CFAO optimized controller.

The frequency response results indicate that all algorithms are capable of reducing frequency deviations and stabilizing the system. However, the CFOA algorithm provides lower overshoot, improved damping characteristics, and shorter settling time, especially under load disturbance conditions.

C. Performance Comparison of Algorithms

Table 2. Performance comparison of GA, GWO, AO and CFOA algorithms based on fitness value and computational time

Algorithm	**Fitness Score**	**Time(s)**
GA	0.039653	239.856
GWO	0.048437	240.37
AO	0.049042	248.76
CFOA	0.037803	224.95

According to the performance results presented in Table 2, the CFOA algorithm demonstrated the most successful performance by outperforming all other methods with both the lowest fitness score (0.037803) and the shortest computational time (224.95 seconds). While the Genetic Algorithm (GA) closely followed CFOA as the second-best algorithm in the optimization process, the GWO and AO algorithms lagged behind in terms of both fitness score and time. Overall, CFOA clearly emerges as the most efficient option for the targeted optimization of our system.

D. Performance Comparison Under Different Disturbance Levels

Table 3. Average ITAE and Computational Time Comparison of GA and CFOA Algorithms Under Different Load Disturbance Levels

Level of Disturbance (pu)	Algorithm	Average ITAE	Avarage Time
0.01	CFOA	0.045200	602.168
0.01	GA	0.048459	612.374
0.02	CFOA	0.057904	599.969
0.02	GA	0.0609927	623.815
0.05	CFOA	0.107192	565.270
0.05	GA	0.131619	628.068

Table 3 compares the performance of the GA and CFOA algorithms in terms of average ITAE and computational time under different load disturbance levels (0.01, 0.02, and 0.05 pu). As the results indicate, the error rates (ITAE) for both algorithms naturally increase as the disturbance level rises due to system fluctuations. However, across all tested disturbance levels, CFOA consistently achieves lower average ITAE values and completes the process in shorter computational times compared to GA. Notably, at the highest disturbance level (0.05 pu), CFOA's superiority over GA in minimizing error becomes even more pronounced. This demonstrates that the CFOA algorithm provides a more robust and faster control performance against sudden load changes in the system.

IV. DISCUSSION

The findings of this study highlight the importance of optimization algorithm selection in load frequency control (LFC) applications. Although all considered algorithms improve system stability and reduce frequency deviations, their performances differ in terms of convergence behavior and dynamic response characteristics. Compared to existing studies in the literature, where algorithms are generally evaluated individually, this study provides a direct comparison under identical system conditions and performance criteria. This enables a clearer evaluation of their effectiveness. The Genetic Algorithm demonstrates more consistent optimization performance, resulting in improved damping characteristics and reduced error values. In contrast, Grey Wolf Optimization and Aquila Optimization provide acceptable results; however, their relatively slower convergence and higher error values indicate certain limitations. In addition, the Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA) demonstrates superior performance especially under load disturbance conditions. The obtained results indicate that CFOA achieves lower ITAE values and better dynamic response characteristics under different disturbance levels. These findings suggest that the choice of optimization algorithm plays a critical role in achieving both accuracy and robustness in renewable energy integrated LFC systems.

V. CONCLUSION

In this study, a renewable energy integrated two-area load frequency control system is investigated. The controller parameters are optimized using Genetic Algorithm (GA), Grey Wolf Optimization (GWO), Aquila Optimization (AO), and Catch Fish Optimization Algorithm (CFOA). Simulation results show that all algorithms improve system stability and reduce frequency deviations. However, the Genetic Algorithm provides lower ITAE values, faster damping, and shorter settling time compared to the other algorithms under nominal operating conditions. In addition, the CFOA algorithm demonstrates better performance under load disturbance conditions by achieving lower ITAE values and improved robustness characteristics. Therefore, it can be concluded that CFOA is an effective and robust optimization approach for controller parameter optimization in renewable energy integrated LFC systems.

REFERENCES

[1] M. Can, M. Ş. Ayas and E. Çelik, "Enhancing automatic generation control in renewable energy-integrated thermal power systems with a novel PID+I^{L} controller tuned by INFO algorithm," Transactions of the Institute of Measurement and Control, pp. 1–13, 2025.

[2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.

[3] A. Daraz, S. A. Malik, I. Azar, S. Aslam, T. Alkhalifah, and U. Akram, "Frequency control of multi-area power system with renewable energy sources using improved fuzzy PID controller," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3386–3401, 2021.

[4] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, and A. Jalili, "Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the next generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, no. 7-8, pp. 315–325, 2009.

[5] D. Sibtain, X. Li, H. Bashir, and M. I. Murtaza, "A novel fractional order PID controller for load frequency control of power systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 160007–160024, 2021.

[6] M. Celik, "A novel fuzzy proportional–integral–derivative controller based on grey wolf optimizer for load frequency control," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 43, no. 3, pp. 624–639, 2021.

[7] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.

[8] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
[9] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. Al-qaness, and A. H. Gandomi, "Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 157, 2021.
[10] X. Zhao, Y. Liu, H. Wang, and Z. Chen, "Catch Fish Optimization Algorithm: A New Human Behavior-Based Metaheuristic Algorithm for Solving Optimization Problems," *Expert Systems with Applications*, vol. 256, p. 124921, 2024.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Laminar Akış Rejimindeki Fe3O4 - [C2mim][CH3SO3] İyonanoakışkanının Sabit Manyetik Alan Şartlarındaki Termo-Hidrolik Performansının Sayısal İncelemesi

Enes Şakirali[a], Emrehan Gürsoy[b,c,], Mehmet Gürdal[c,d], Engin Gedik[b,e]*

[a]Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalı, Karabük/Türkiye.
[b]Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Rize/Türkiye.
[c]Karabük Üniversitesi, Enerji Uygulamaları Merkezi Laboratuvarı, Karabük/Türkiye
[d]Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu/Türkiye.
[e]Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** emrehan.gursoy@erdogan.edu.tr

ÖZET

İyonanoakışkanlar (INA'lar), nanoteknoloji tabanlı ısı transfer sıvılarının yeni bir sınıfı olup yüksek sıcaklıklardaki termal kararlılıkları ve çevre dostu özellikleri nedeniyle termal enerji sistemlerinde büyük ilgi görmektedir. Bu çalışma kapsamında, sabit manyetik alan şiddeti altında (B_0 = 0, 0,5, 1, 1,5 T) INA'ların termomanyetik konveksiyon performansı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı kütlesel konsantrasyonlarda (%1-15 ağırlıkça (wt.)) Fe_3O_4 nanopartikülleri içeren su-[C_2mim][CH_3SO_3] (1-Etil-3-metilimidazolium Metan Sülfonat) iyonik sıvı karışımları (iyonanoakışkan) kullanılmıştır. İyonanoakışkan akışı, yüzeyine sabit ısı akısı (q" = 3000 W.m^{-2}) ve bölgesel sabit manyetik alan uygulanan dairesel, düz bir kanalda laminer akış koşulları altında incelenmiştir. Sayısal çalışmalar sonlu hacimler metodu yaklaşımı ile Ansys Fluent Programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zorlanmış taşınım şartlarında gerçekleştirilen analizlerde tüm nanopartikül kütlesel konsantrasyonları için manyetik alanın, manyetik alan uygulanmayan durumlara kıyasla daha yüksek ısı transferi artışı sağladığı ve bu artışların %16'ya kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Ancak, uygulanan manyetik alan şiddetinin ve nanopartikül konsantrasyonunun artması, kanal içi basınç düşümünü artırarak performans değerlendirme kriterlerinde (PDK) düşüşe neden olmuştur. Sonuç olarak incelenen INA'lar arasında en yüksek PDK değeri %1 Fe_3O_4 nanopartikülü konsantrasyonunda ve manyetik alan etkisinin olmadığı durumlarda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Isı transferi, İyonanoakışkan, Laminer akış, Manyetik alan, Performans değerlendirme kriteri.*

Numerical Investigation of Thermo-Hydraulic Performance of Fe_3O_4-[C_2mim][CH_3SO_3] Ionanofluid in Laminar Flow Regime Under Constant Magnetic Field Conditions

Enes Şakirali[a], Emrehan Gürsoy[b,c,], Mehmet Gürdal[c,d], Engin Gedik[b,e]*

[a]Karabük University, Institute of Graduate Programs, Department of Energy Systems Engineering, Karabük/Türkiye.
[b]Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Systems Engineering, Rize/Türkiye.
[c]Karabük University, Center of Energy Applications Laboratory, Karabük/Türkiye.
[d]Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kastamonu/Türkiye.
[e]Karabük University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Mechanical Engineering, Karabük/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** emrehan.gursoy@erdogan.edu.tr

ABSTRACT

Ionanofluids (INFs) are a new class of nanotechnology-based heat transfer fluids that are attracting great interest in thermal energy systems due to their high-temperature thermal stability and environmentally friendly properties. In this study, the thermomagnetic convection performance of INFs under constant magnetic field strength (B_0 = 0, 0.5, 1, 1.5 T) was numerically investigated. In this study, ionic fluid mixtures

(ionanofluids) of water-[C_2mim][CH_3SO_3] (1-Ethyl-3-methylimidazolium Methane Sulfonate) containing Fe_3O_4 nanoparticles at different mass concentrations (1-15% by weight) were used. Ionanofluid flow was investigated under laminar flow conditions in a circular, straight channel with a constant heat flux (q" = 3000 W.m^{-2}) and a localized constant magnetic field applied to its surface. Numerical studies were performed using the finite volume method approach with Ansys Fluent. In analyses performed under forced convection conditions, it was observed that the magnetic field provided a higher heat transfer increase for all nanoparticle bulk concentrations compared to the cases without magnetic field application, and these increases could reach up to 16%. However, increasing the applied magnetic field strength and nanoparticle concentration increased the intrachannel pressure drop, causing a decrease in the performance evaluation criteria (PEC). As a result, the highest PEC value among the investigated INFs was obtained at a 1% Fe_3O_4 nanoparticle concentration and absence of magnetic field effect conditions.

Keywords: *Heat transfer, Ionanofluid, Laminar flow, Magnetic field, Performance evaluation criterion.*

I. GİRİŞ

Günümüzde küresel enerji ihtiyacının hızla artması ve buna bağlı olarak ekonomik baskıların yoğunlaşması, mevcut termal sistemlerin daha verimli hâle getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yüksek performanslı termal cihazlara olan talebin artışı, enerji üretim sistemlerinin daha yüksek güç çıktılarıyla çalışmasını gerektirmekte; bu durum ise ısı transfer performansının iyileştirilmesini modern mühendisliğin temel problemlerinden biri hâline getirmektedir [1]. Bu doğrultuda, ısı transferinin artırılmasına yönelik en yaygın yaklaşımlardan biri, çalışma akışkanlarının termofiziksel özelliklerinin geliştirilmesidir. Isı transfer sistemlerinde ve deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan akışkanlardan biri de iyonik sıvılardır. Bu bağlamda, iyonik sıvılar (IS'ler) yeni nesil ısı transfer akışkanları olarak dikkat çekmektedir. IS'ler; geniş bir sıcaklık aralığında (yaklaşık 293 K'den 1000 K'nin üzerine kadar) sıvı fazda kalabilen tuzlar olup, ihmal edilebilir buhar basıncı, yüksek termal kararlılık, yüksek iyonik iletkenlik ve güçlü çözücü özellikler gibi üstün termofiziksel özelliklere sahiptir. Ayrıca, uçucu ve yanıcı olmamaları ile geri dönüştürülebilir olmaları, bu akışkanları çevre dostu bir seçenek hâline getirmektedir. Bu özellikleri sayesinde IS'ler, özellikle yüksek sıcaklık ve düşük basınç koşullarında etkili birer ısı transfer ortamı olarak öne çıkmaktadır [2].

IS'ler ile nanoakışkan teknolojisinin birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan iyonanoakışkanlar (INA'lar), son yıllarda önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. İlk olarak Nieto de Castro ve arkadaşları tarafından 2010 yılında tanıtılan bu akışkanlar, nanoparçacıkların iyonik sıvılar içerisinde dağıtılmasıyla elde edilmektedir [3]. Yapılan çalışmalar, INA'ların saf IS'lere kıyasla daha yüksek ısıl iletkenlik ve ısı kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle INA'lar, yüksek performans gerektiren ısı transfer uygulamaları için umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde, INA'ların termofiziksel özellikleri ve ısı transfer performansına yönelik çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Nieto de Castro ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, farklı kütle konsantrasyonlarına sahip çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) içeren INA'lar ([C_6mim][BF_4], [C_4mim][CF_3SO_3] ve [C_4mpyrr][$(CF_3SO_2)_2N$]) hazırlanarak bu akışkanların ısıl iletkenlik ve ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, %3,0 kütlesel konsantrasyonda ısıl iletkenlikte yaklaşık %26 oranında bir artış olduğunu göstermiştir [3]. Prasad ve Selvakumar tarafından yapılan sayısal çalışmada ise Al_2O_3/[C_4mim][NTf_2] INA'lar, %0–%2,5 hacimsel konsantrasyon aralığında ve laminer akış rejiminde (250 ≤ Re ≤ 1000), 293 K, 313 K ve 333 K giriş sıcaklıkları için iki boyutlu bir kanalda zorlanmış taşınımı incelenmiştir. Çalışma sonuçları, INA'ların özellikle yüksek sıcaklıklarda, geleneksel su bazlı nanoakışkanlara kıyasla daha yüksek ısı transfer performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, INA'laryüksek sıcaklık uygulamalarında kullanım potansiyelinin daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [4]. Bunun yanı sıra Minea ve Murshed tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, dairesel bir kanalda farklı kütle konsantrasyonlarına sahip Al_2O_3/[C_4mim][NTf_2], MWCNT/[C_4mim][NTf_2], MWCNT/[HMIM][BF_4] ve Graphene/[HMIM][BF_4] INA'ları kullanılarak ısı transfer özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, %0,9 konsantrasyonda Al_2O_3/[C_4mim][NTf_2] INA için Re = 500 değerinde ısı transfer katsayısında yaklaşık %200 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, MWCNT/[HMIM][BF_4] ve Graphene/[HMIM][BF4] INA'larında kütle konsantrasyonunun artmasıyla birlikte ısı transfer katsayısının da arttığı belirlenmiştir [5]. Son olarak, INA'ların ısı transfer performansını daha da artırmak amacıyla manyetik alan etkisinin incelendiği çalışmalar dikkat çekmektedir. Manyetik alanın, özellikle manyetik özellik gösteren nanoparçacıklar içeren akışkanlarda, akış yapısını ve ısı transfer mekanizmasını önemli ölçüde etkileyebileceği bilinmektedir. Bu kapsamda, M. Gaber ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kare kesitli kapalı bir ortamda Al_2O_3/[C_4mim][NTf_2] INA'sı kullanılarak, farklı hacimsel konsantrasyonlarda (%0,5, %1,0 ve %2,5) ve yatay manyetik alan altında (0 ≤ Ha ≤ 60) ısı transferi

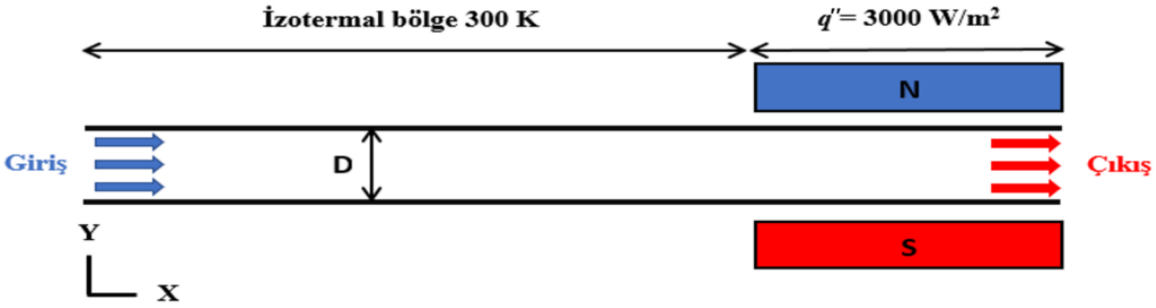
üzerindeki etkiler sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, manyetik alanın INA ısı transfer katsayısını azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, Rayleigh sayısının artmasıyla ısı transfer katsayısının da arttığı belirlenmiştir [6]. Bu çalışmalarda ise, farklı akış koşullarındaki farklı INA'ların, kanal ve ısı kaynaklarının farklı yerleşim düzenlerinin, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir.

II. MATERYAL METOT

Gerçekleştirilen bu çalışmada q" = 3000 W/m^2 ısı akısı ve farklı sabit manyetik alan (B_0 = 0, 0,5, 1, 1,5 T) etkisi altında üç boyutlu dairesel kesitli kanaldaki INA'nın akış ve ısı transfer karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, Fe_3O_4 nanopartikül farklı kütle konsantrasyonlarda (%1,0, %2,5, %5,0, %10, %15), baz akışkan 0,25 saf su-0,75 IS (1-Etil-3-metilimidazolyum metansülfonat, [C_2mim][CH_3SO_3]) karışımı içerisine katılarak oluşturulan INA'lar kullanılmıştır. Akış kanal girişinde uniform olup hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminer akış (500<Re<2000) şartlarında incelenmiştir. Sayısal çalışmada Sonlu Hacimler Yöntemine dayalı çözümleme yapabilen Ansys Fluent 2020 R2 Programı kullanılmıştır.

A. Çalışma Geometrisinin Sınır Şartları

Araştırılan problemin geometrik modeli Şekil 1'de gösterilmektedir. Model D = 0,12 m'lik çapa sahip iki bölgeden oluşan dairesel kesitli bir kanaldır. Model geometrinin ilk kısmı L_1 = 5,76 m'lik bir izotermal bölgeden, L_2 = 2,88 m'lik ikinci bölge ise uniform olarak ısıtılmış (q" = 3000 W/m^2) ve manyetik alan (0T, 0,5T, 1,0T 1,5 T) etkisi altındadır.



Şekil 1. Problem geometrisi.

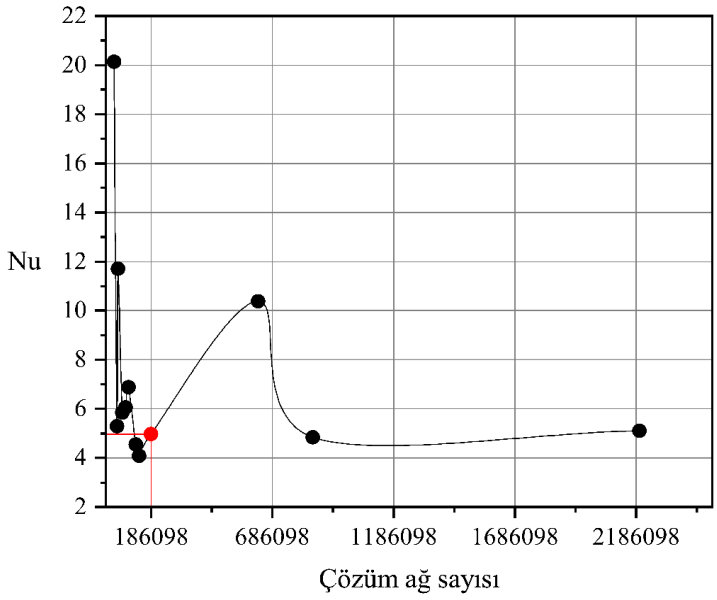
B. Sistemin Sayısal Analizi

Modelin akış alanın ait ağ kalitesi simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini ve doğruluğunu etkilemektedir. Uygun bir ağ kalitesi belirlemek için bir ağ iyileştirme çalışması yapılmalıdır. Bunun için giriş hızı 0,0041758 m/s olan saf su seçilip, farklı ağ boyutu kullanılarak temel ağ kalite parametreleri ve en uygun sayısal ağ yapısı Tablo 1'de verilmiştir.

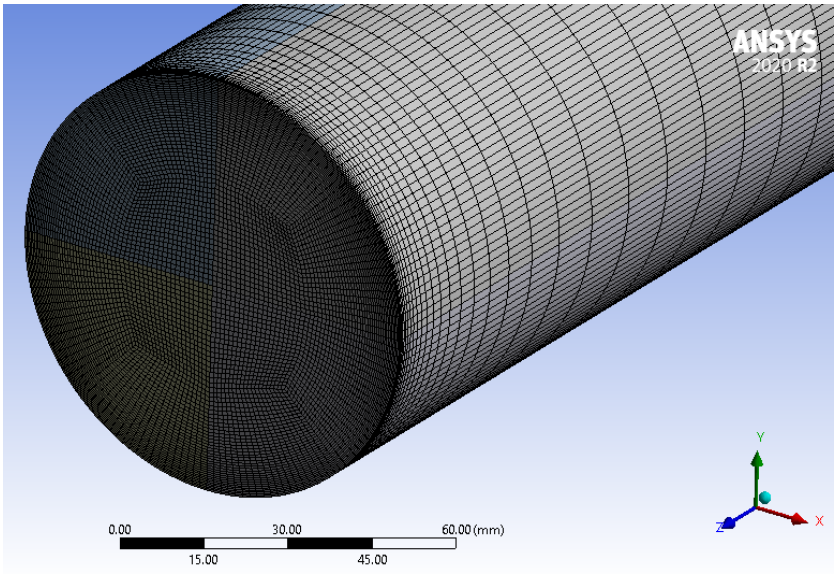
Tablo 1. Farklı ağ yapılarında hesaplanan Nu değerleri.

Mesh Çalışma Sayısı	Hücre Sayısı	Nusselt Sayısı
1	93.771	6,88
2	124.062	4,54
3	137.416	4,08
4	**186.098**	**4,96**
5	627.440	10,37
6	853.800	4,84
7	2,200.140	5,11

Ağ analizi için yapılan hesaplamalar sonucunda Tablo 1'de açıkça görülebileceği gibi ağ boyutu küçüldükçe (ağ yoğunluğu arttıkça) Nusselt sayısında azalmalar meydana gelmiş ve belli bir ağ boyutundan sonra Nusselt sayısında önemli ölçüde bir değişim gözlenmemiştir. Problemin çözümünde hexahedra tip hücre kullanılmıştır. Çözüm hücre sayısı 186.098 olduğu durumda Nusselt sayısı bir sonraki hücre sayısına göre çok farklılık olmadığı için bu geometride en uygun çözüm hücre sayısı 186,098 olarak seçilmiştir. Şekil 2'de hesaplanan Nu değeri ve Şekil 3'te geometrinin mesh yapısı verilmiştir.



Şekil 2. Ağdan bağımsız çalışma.



Şekil 3. Boru giriş, çıkış ve duvar bölgelerinde oluşturulan ağ (mesh) yapısının hücre dağılımı.

C. Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

Tablo 2'de saf su ve iyonik sıvının bu çalışmada kullanılan termofiziksel özelliklerinin değerleri verilmiştir. Aşağıdaki denklemler kullanılarak, Tablo 3'teki su-iyonik sıvı karışımına ait termofiziksel özellikler elde edilmiştir.

Tablo 2. İyonik sıvı ve suyun özellikleri.

Özellik	İyonik sıvı [C_2mim][CH_3SO_3]	Su
m (moleküler kütle)	206,3 g/mol	18,01 g/mol
ρ (yoğunluk)	1242,6 kg/m^3	997,8 kg/m^3
x (mol oranı)	0,75	0,25
V (mol hacmi)	0,166	0,01804
Φ_i (hacim oranı)	0,965	0,03496
w_i (kütle oranı)	0,02828	0,9717

D. Su-İyonik Sıvı Karışımın Termofiziksel Özellikleri

Karışımın yoğunluğu takip edilen Eş. (1) vasıtasıyla hesaplanmıştır [7].

$$\rho = w_{i_{is}}\rho_{is} + w_{i_{su}}\rho_{su} \quad (1)$$

Karışımın özgül ısı kapasitesi aşağıdaki Eş. (2) yardımı ile bulunmuştur [7].

$$Cp = w_{i_{is}}Cp_{is} + w_{i_{su}}Cp_{su} \quad (2)$$

Karışımın ısıl iletkenliği (k) aşağıda Eş. (3) ile elde edilmiştir [8].

$$k = \left(1 - w_{i_{is}}\right)k_{su} + w_{i_{is}}k_{\text{İS}} - 0{,}72(k_{su} - k_{\text{İS}})\left(1 - w_{i_{is}}\right)w_{i_{is}} \quad (3)$$

Karışımın viskozitesi Eş. (4) ile bulunmuştur [9].

$$log(\mu) = x_{is}log(\mu_{is}) + x_{su}log(\mu_{su}) \quad (4)$$

Karışımın elektriksel iletkenliği aşağıdaki Eş. (5) ile hesaplanmıştır [10].

$$\sigma = x_{su}^2\sigma_{su} + x_{\text{İS}}^2\sigma_{\text{İS}} + 2x_{su}x_{\text{İS}}\sigma_{su} \quad (5)$$

Tablo 3. Su-iyonik sıvı karışımın termofiziksel özellikleri.

Özellik	[0.75 İS + 0.25 SU]	[0.50 İS + 0.50 SU]	[0.25 İS + 0.75 SU]
Yoğunluk (kg/m^3)	1236	1223	1192
Özgül Isı (J/kg.K)	1767	1896	2213
Isı İletkenlik (W/m.K)	0,1915	0,1991	0,2245
Viskozite (kg/m.s)	43,75	12,43	3,531
Elektrik iletkeliği (m/s)	0,1676	0,1023	0,06306

E. İyonanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Mol oranlarına göre hazırlanan saf su-iyonik sıvı karışımları, [0,75 İS + 0,25 SU] karışımı seçilerek Fe_3O_4 nanopartikülünün baz akışkanı olarak kullanılmıştır. Aşağıdaki denklemler aracılığı ile Tablo 4'teki iyonanoakışkana ait termofiziksel özellikler elde edilmiştir. Tablo 4'te görüleceği üzere, nanopartikülün kütlesel oranı arttıkça, yoğunluk, ısıl iletkenlik, viskozite, elektriksel iletkenlik artmaktadır.

İyonanoakışkanın yoğunluğu takip edilen Eş. (6) vasıtasıyla hesaplanıştır [11].

$$\rho_{ina} = \varphi\rho_{np} + (1 - \varphi)\rho_{ba} \quad (6)$$

İyonanoakışkanın özgül ısı kapasitesi aşağıdaki gibi Eş. (7) yardımıyla bulunmuştur [11].

$$Cp_{ina} = \frac{\varphi\rho_{np}\,Cp_{np} + (1-\varphi)\rho_{ba}Cp_{ba}}{\varphi\rho_{np} + (1-\varphi)\rho_{ba}} \quad (7)$$

İyonanoakışkanın viskozitesi Eş. (8) ile bulunmuştur [12].

$$\mu_{ina} = \frac{\mu_{ba}}{(1-\varphi)^{2,5}} \quad (8)$$

İyonanoakışkanın ısıl iletkenliği (k_{ina}) aşağıdaki Eş. (9) ile elde edilmiştir [11].

$$\frac{k_{ina}}{k_{ba}} = \frac{k_{np} + 2\,k_{np} + 2\varphi(k_{np} - k_{ba})}{k_{np} + 2k_{ba} - \varphi(k_{np} - k_{ba})} \quad (9)$$

İyonanoakışkanın elektriksel iletkenliği aşağıdaki Eş. (10) vasıtasıyla hesaplanmıştır [13].

$$\sigma_{ina} = (1 - \varphi)\sigma_{ba}\,\varphi\sigma_{np} \quad (10)$$

Tablo 4. İyonanoakışkanın termofiziksel özellikleri.

Özellik	Fe_3O_4	1 wt.% Fe_3O_4	2.5 wt.% Fe_3O_4	5 wt.% Fe_3O_4	10 wt.% Fe_3O_4	15 wt.% Fe_3O_4
Yoğunluk (kg/m^3)	5200	1245	1260	1285	1338	1396
Özgül ısı (J/kg.K)	670	1756	1740	1712	1657	1602
Isı iletkenlik (W/m.K)	6	0,1928	0,1947	0,1980	0,2053	0,2133
Viskozite (kg/m.s)	0	0,04401	0,04442	0,04513	0,0467	0,04848
Elektriksel iletkenlik (m/s)	25000	60,05	151,6	309,1	643,4	1007

F. Sayısal Verilerin Hesaplanması

Isı transferi, uygulanan tüm akışkanlar için taşınımla oluşan ısı transfer katsayısı (h) açısından Eş. (11) ve Eş. (12) aracılığıyla analiz edilmiştir [14].

$$h = \frac{q}{(T_w - T_{mean})} \tag{11}$$

$$T_{mean} = \frac{\int_0^R VT\,(2\pi r)dr}{\int_0^R V\,(2\pi r)dr} = \frac{\int_0^R VrTdr}{\int_0^R Vrdr} \tag{12}$$

Nusselt sayısının hesaplanması Eş. (13) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

$$Nu = \frac{h\ D}{k} \tag{13}$$

h ($W/m^2.K$) taşınım ile gerçekleşen ısı transfer katsayısını, D (m) boru çapı, k (W/m.K) ısı iletim katsayısını, q" (W/m^2) ısı akısını ifade belirtmektedir.

Eş. (14) ve Eş. (15) Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayılarını ifade etmektedir [15].

$$Re = \frac{\rho\ V\ D}{\mu} \tag{14}$$

$$Pr = \frac{C_P\ \mu}{k} \tag{15}$$

Boru giriş ve çıkış kısmından alınan basınç verilerinin ortalamasını hesaplayarak boru içi basınç düşüşü hesaplanmıştır. Eş. (16) vasıtasıyla ortalama Darcy sürtünme faktörü (f) hesaplanmıştır [15].

$$f = \frac{P_{giriş} - P_{çıkış}}{\left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \tag{16}$$

Sabit ısı akısına maruz kalan borularda laminer akış durumunda ortalama Darcy sürtünme faktörü Eş. (17) ile hesaplanmaktadır [15].

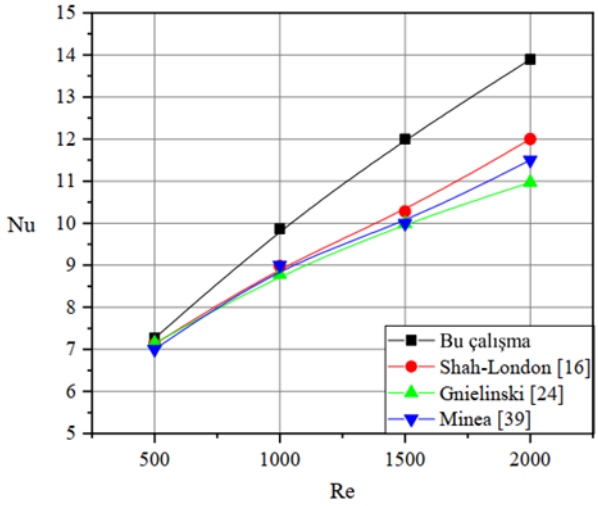
$$f = \frac{64}{Re} \tag{17}$$

Çalışmada kullanılan iyonanoakışkanın verimliliğini ifade eden Performans Değerlendirme Katsayısı (PDK) Eş. (18) ile hesaplanmaktadır [15].

$$PDK = \frac{\left(\frac{Nu_{nf}}{Nu_{bf}}\right)}{\left(\frac{f_{nf}}{f_{bf}}\right)^{\frac{1}{3}}} \tag{18}$$

III. SONUÇLAR

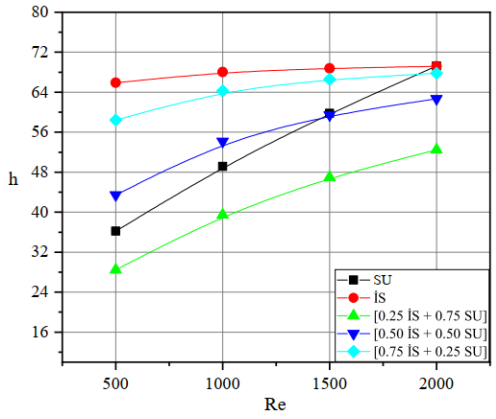
Elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve doğruluğunu ispat edebilmek için öncelikle çalışma akışkanı olarak saf su kullanılan durum için laminer akış şartlarında sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrulama analizinden elde edilen sonuçlar literatürdeki eşitliklerle karşılaştırılarak Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te Nu değerinin Re değeri ile değişimi görülmektedir. Analiz sonuçlarının Shah-London [16] tarafından önerilen korelasyonla ±%10, Minea [17] korelasyonuyla ±%10 ve Gnielinski [18] korelasyonu ise ±%12 hata oranı içinde olduğu görülmüştür. Şekil 4'ten açık bir biçimde görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir.



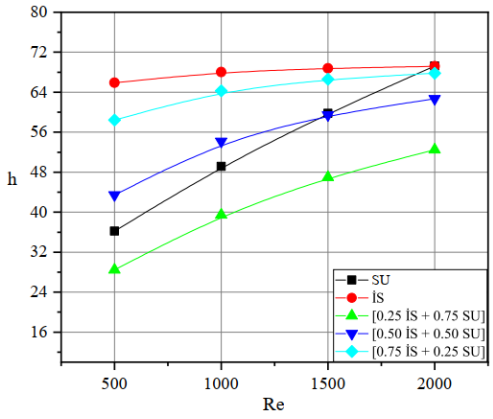
Şekil 4. Nu değerin sonuçları literatürle karşılaştırılması.

A. *Isı Taşınım Katsayısı "h" Sonuçları*

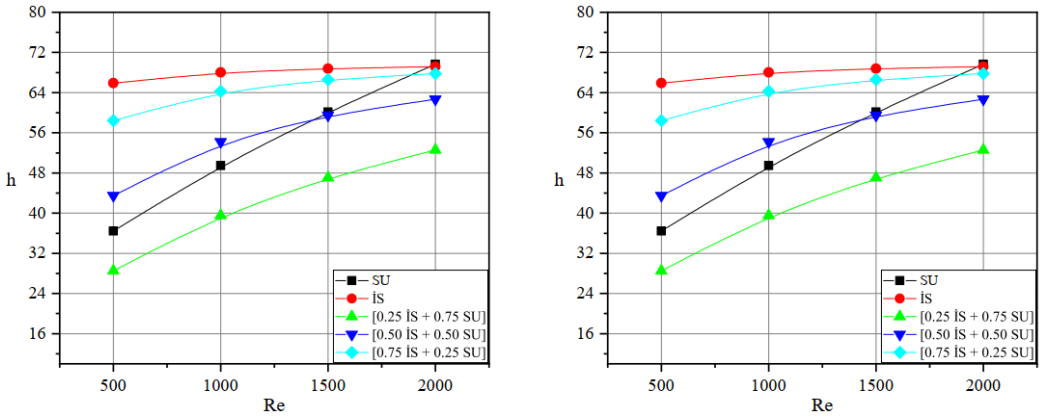
Şekil 5'te görüldüğü gibi su ve iyonik sıvı karışımlarının Re sayısına bağlı olarak ısı taşınım katsayısının değişimi görülmektedir. Şekil 5.a'dan görülebileceği gibi Re sayısı ve iyonik sıvının mol oranı arttıkça karışımların h değeri artmaktadır. (0,25is+0,75su), (0,50is+0,50su), (0,75is+0,25su) karışımların saf su kullanılan duruma göre Re=500 değeri için h değeri sırasıyla %-21, %20 ve %61 artmaktadır. Bununla birlikte Re sayısının artması durumunda, karışımların h değerleri Re = 500 ile 2000 arasında sırasıyla %85, %44 ve %16 oranında artış olduğunu tespit edilmiştir. Sabit manyetik alan (B = 0,5, 1, 1,5 T) etkisi altında Su-iyonik sıvı karışımların h değeri Şekil 5.b,c,d'de görüldüğü gibi manyetik alan etkisi olmayan (B = 0 T) durumla aynı performansı göstermektedir.



(a) B = 0 T



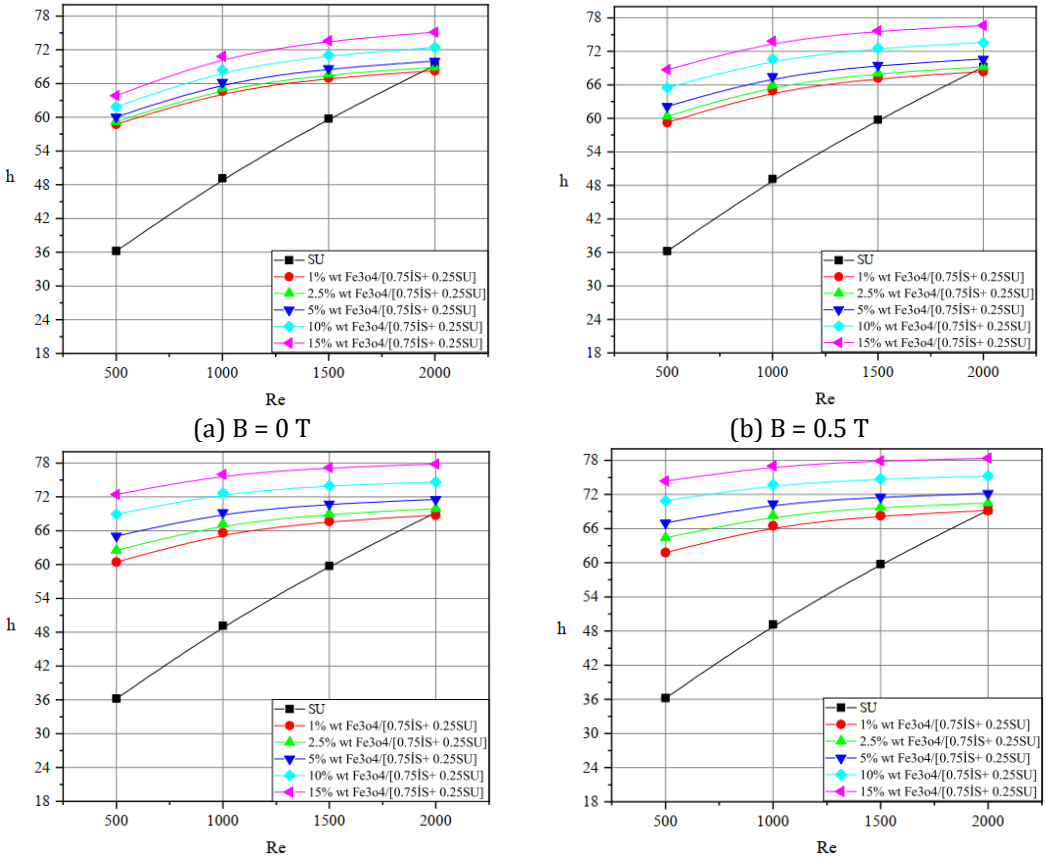
(b) B = 0.5 T



(c) B = 1 T (a) B = 1.5 T

Şekil 5. Karışımların farklı manyetik alan durumunda h değerinin Re değerine göre değişimi.

Şekil 6'da farklı kütlesel nanopartikül konsantrasyonundaki iyonanoakışkanın manyetik alan uygulanmadığı (B=0 T) ve sabit manyetik alan uygulandığı durumlarda Re sayısına bağlı olarak ısı taşınım katsayısının değişimini göstermektedir. Şekil 6.a'da B = 0 T durumundan görülebileceği gibi Re değeri artmasıyla ve baz akışkana Fe3O4 nanopartikülünün ilave edilmesiyle birlikte h değeri artmaktadır. Re = 1000 değeri için 1,0, 2,5, 5,0, 10 ve 15 wt. % iyonanoakışkan saf su kullanılan duruma göre h değeri sırasıyla %31,5, %32,7, %34,7, %39,1, %44 artmaktadır. Manyetik alan (B = 0,5, 1, 1,5 T) uygulandığı durumda ise Şekil 5.b,c,d'de görüldüğü gibi iyonanoakışkan saf su ile karşılaştırıldığında 1 wt.% ve Re = 500 değeri için %64, %67 ve %71 artış tespit edilirken, 15 wt.% kütlesel konsantrasyon için %90, %100 ve %105 artış elde edilmiştir.



(a) B = 0 T (b) B = 0.5 T

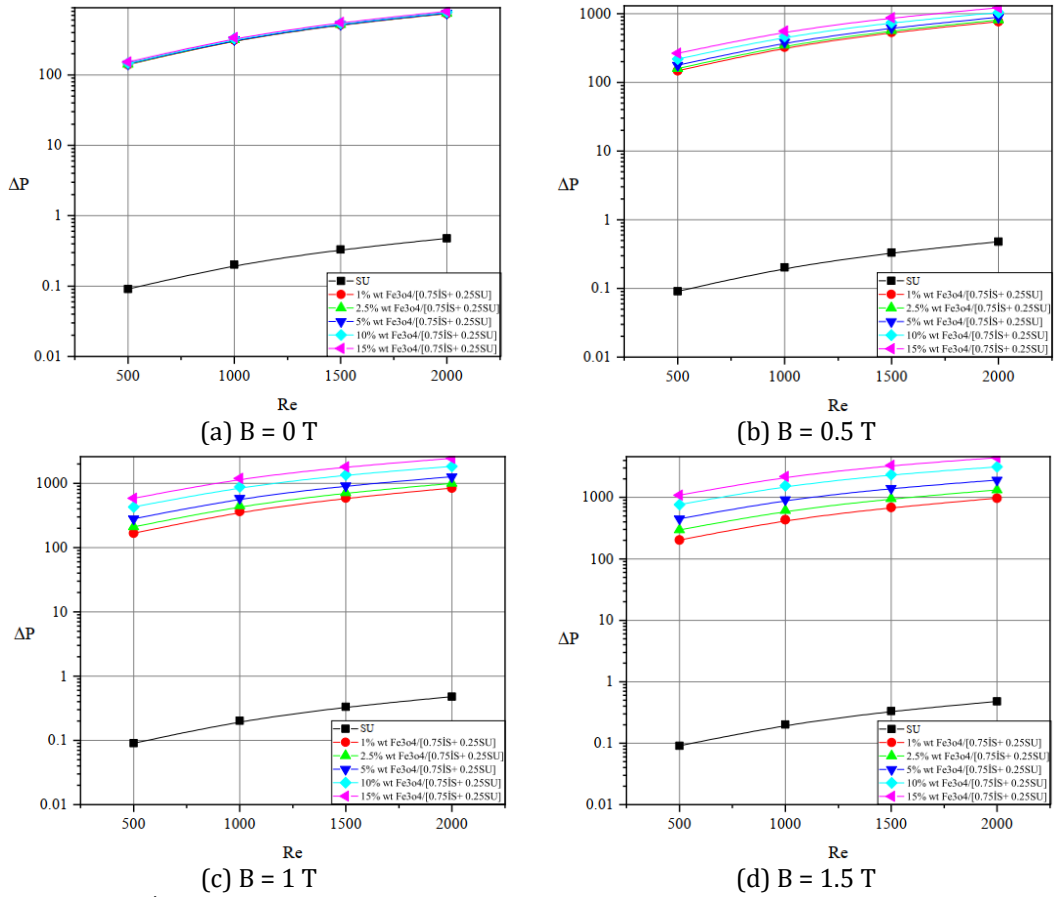
(c) B = 1 T (d) B = 1.5 T

Şekil 6. İyonanoakışkanın farklı manyetik alan durumunda h değerinin Re değerine göre değişimi.

B. Performans Değerlendirme Katsayısı (PDK)

Saf su ve iyonanoakışkanın basınç düşümü ΔP değerlerinin Re sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7.a'den görüleceği üzere, iyonanoakışkanın dinamik viskozite değeri saf suyun dinamik viskozite değerine göre daha yüksek olmasından dolayı basınç düşüşünün daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca nanopartikül kütlesel konsantrasyonu arttıkça ΔP değeri artmaktadır. Şekil 7.b,c,d'de sabit manyetik alan (B = 0,5, 1, 1,5 T) uygulandığı durumda manyetik alanın uygulanmadığı duruma göre 1 wt.% ve Re = 500 değeri için %5, %19 ve %44 artış gösterirken, 15 wt.% kütlesel konsantrasyon için %73, %285 ve %615 artış elde edilmiştir. Aynı etkiler Re = 2000 değerinde de fark edilir, 1 wt.% kütlesel konsantrasyon için ΔP değeri %3, %13 ve %30 olarak tespit edilirken, 15 wt.% kütlesel konsantrasyon için, %51, %206 ve %454 olarak hesaplanmıştır.

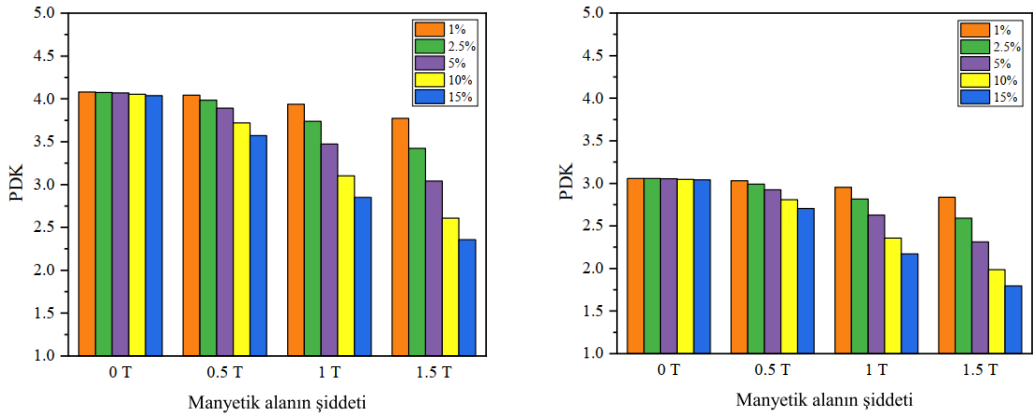
1,0, 2,5, 5,0, 10 ve 15 wt. % kütlesel konsantrasyondaki Fe_3O_4/[0,75İS+0,25SU] iyonanoakışkanın performans değerlendirme katsayısı (PDK) farklı manyetik alan şiddetine bağlı olarak değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi manyetik alan şiddeti artmasıyla ve baz akışkana Fe_3O_4 nanopartikülünün ilave edilmesiyle birlikte PDK değeri azalmaktadır. Ayrıca Re sayısı arttıkça PDK değeri azalmaktadır. Sabit manyetik alan (B = 0,5, 1, 1,5 T) etkisi altında Nu değeri yükselmesine rağmen ortalama Darcy sürtünme faktörünün daha fazla artışı nedeniyle Fe3O4 nanopartikülü içeren iyonanoakışkanlarda PDK değerinin azalmasına neden olmuştur. En yüksek PDK değeri manyetik alan etkisi olmadan (B = 0) ağırlıkça %1 olan iyonanoakışkan için belirlendi.



(a) B = 0 T (b) B = 0.5 T

(c) B = 1 T (d) B = 1.5 T

Şekil 7. İyonanoakışkanın farklı manyetik alan durumunda Δ*P* değerinin Re değerine göre değişimi.



(a) Re = 1000 (b) Re = 2000

Şekil 8. Performans değerlendirme katsayısının manyetik alan şiddetile değişimi.

IV. TARTIŞMA

İyonik sıvının saf su ile karıştırılması sonucunda, iyonik sıvının mol oranına bağlı olarak karışımın yoğunluğu, viskozitesi ve elektriksel iletkenliğinde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Tüm çalışmalarda, [0,75İS + 0,25SU] karışımına Fe_3O_4 nanopartiküllerinin ilave edilmesinin, taşınımla gerçekleşen ısı transfer miktarını artırdığı görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde, iyonanoakışkanların saf suya kıyasla daha yüksek ısı transfer katsayısı sağladığı tespit edilmiştir. Manyetik alan uygulanmadığı durumda, en yüksek taşınımla ısı transfer artışı, saf su kullanılan duruma göre %75'e varan iyileşme gösteren 15 wt.% Fe_3O_4 iyonanoakışkanında elde edilmiştir. Manyetik alan uygulandığında ise (B = 1,5 T), aynı akışkan için bu artış oranı %105'e ulaşmıştır. Re = 2000 değerinde, 15 wt.% Fe_3O_4 / [0,75İS + 0,25SU] iyonanoakışkanı için h = 70,85 W/m^2K değeri en yüksek taşınımla ısı transfer katsayısı olarak hesaplanmıştır. Sabit manyetik alanın taşınımla ısı transferi üzerindeki etkisinin düşük Re sayılarında daha belirgin olduğu, buna karşı yüksek Re sayılarında etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Re sayısı ile manyetik alan şiddeti arttıkça basınç düşümü değerlerinin de yükseldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte hem taşınımla ısı transferi hem de pompalama gücü açısından en uygun performansın, manyetik alan etkisi bulunmayan durumda (B = 0), 1 wt.% Fe_3O_4 / [0,75İS + 0,25SU] iyonanoakışkanının Re = 1000 değerinde elde edildiği sonucuna varılmıştır.

V. ÇIKARIM

Sayısal çalışma sonuçlarına göre, laminer akış şartlarında sabit manyetik alan uygulamasının ısıl özelliklerin iyileştirilmesinde daha verimli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Fe_3O_4 / [0,75İS + 0,25SU] iyonanoakışkanının kullanıldığı laminer akış koşullarındaki sayısal analizler sonucunda, bu akışkanın ısı transfer performansı açısından etkin ve verimli bir çalışma akışkanı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] E. I. Chereches, "Experimental study on thermophysical properties of alumina nanoparticle enhanced ionic liquids." *Journal of Molecular Liquids*, 291, 111332, 2019.

[2] A. Hosseinghorbani, M. Mozaffarian and G. Pazuki, "Application of graphene oxide IoNanofluid as a superior heat transfer fluid in concentrated solar power plants," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 111, 104, 2020.

[3] C. A. Nieto de Castro, "Thermal properties of ionic liquids and ionanofluids of imidazolium and pyrrolidinium liquids." *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(2), 653-661, 2010.

[4] S. Shyam Prasad and R. Deepak Selvakumar, "Heat transfer performance of Al_2O_3–([C4mim][NT f2]) nano-suspension in a 2– D channel for application in a flat plate solar collector." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 577. No. 1, p. 012006

[5] A. A. Minea and S. S. Murshed, "A review on development of ionic liquid based nanofluids and their heat transfer behavior." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 584-599, 2018.

[6] N. M. A. A. H. A. E. M. E. M. & E.-m. Gaber, W. M. (2020). AmericanJournal of Engineering Research (AJER) American Journal of Engineering Research (AJER) Heat Transfer By Ionic Nanofluids In The presence of magnetic field.

[7] G. Guevara-Carrion, T. Janzen, Y. M. Muñoz-Muñoz and J. Vrabec, "Mutual diffusion of binary liquid mixtures containing methanol, ethanol, acetone, benzene, cyclohexane, toluene, and carbon tetrachloride", *The Journal of Chemical Physics*, 144(12), 1245.

[8] M. Aftabuzzaman, M. M. Islam, F. R. Rima, M. N. Islam and M. A. Ali, "Volumetric and transport properties of binary liquid mixtures of sulfolane with aniline, N, N-dimethylaniline and N, N-diethylaniline at different temperatures and atmospheric pressure", *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 96, 181-186.

[9] M. Szymanska-Kolodziej, P. Kolodziej, L. Rycerz and M. Gaune-Escard, "Phase Diagram and Electrical Conductivity of the AgCl-NdCl3 Binary System", *Zeitschrift für Naturforschung A*, 63(5-6): 364-370, 2008.

[10] A. Minea, "Uncertainties in modeling thermal conductivity of laminar forced convection heat transfer with water alumina nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68 (2): 78-84, 2014.

[11] H. Heidary, R. Hosseini, M. Pirmohammadi and M. J. Kermani, “Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 11-17, 2015.
[12] M. M. Maseer, F. B. I. Alnaimi, R. M. Hannun, L. C. Wai, K. A. H. Al-Gburi and S. O. Mezan, “A review of the characters of nanofluids used in the cooling of a photovoltaic-thermal collector”, *Materials Today: Proceedings*, 57, 329-336, 2022.
[13] E. I. Chereches, M. Chereches, A. A. Minea, J. I. Prado and L. Lugo, “A numerical approach in the assessment of a new class of fluids performance in laminar flow”, *Materials Science and Engineering*, 591(1), 012044, 2019.
[14] E. I. Chereches, A. A. Minea and K. V. Sharma, "A complex evaluation of [C2mim][CH3SO3]–alumina nanoparticle enhanced ionic liquids internal laminar flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154, 119674, 2020.
[15] E. Gedik, "Experimental and numerical Investigation on laminar pipe flow of magneto-rheological fluids under applied external magnetic field," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(3), 801-811, 2017.
[16] R. Ramirez-Tijerina, C. I. Rivera-Solorio, J. Singh and K. Nigam, “Numerical study of heat transfer enhancement for laminar nanofluids flow”, *Applied Sciences*, 8 (12): 2643-2661, 2018.
[17] W. Chen, C. Zou and X. Li, “An investigation into the thermophysical and optical properties of SiC/ionic liquid nanofluid for direct absorption solar collector”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163, 157-163, 2017.
[18] J. A. Rangababu and K. Kumar, “Numerical analysis and validation of heat transfer mechanism of flat plate collectors”, *Procedia Engineering*, 127, 63-70, 2015.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Tedarik zincirlerindeki büyük veri yeteneklerini analiz etmek için Fermatean bulanık karar destek sistemi için termodinamik bir yöntem

Murat Kirişci[a], Emrah Evren Kara[b]*

[a] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Biyoistatistik ve Tıp Bilişimi Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b] Düzce Üniversitesi, Matematik Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: murat.@mail.edu.tr

ÖZET

Termodinamik, bir sistemin kararlılığını (veya kararsızlığını) etkili bir şekilde betimlemek için bir bilgi yapısına sahiptir. Uygulama problemlerinin artan karmaşıklığı ve insan düşüncesinin bulanık doğası göz önüne alındığında, Fermatean bulanık kümeler belirsizliği modellemek için güçlü bir araç haline gelmiştir. Fermatean bulanık bir ortamda çok kriterli karar verme problemlerini daha iyi ele almak için, bu makale ilk olarak karar bilgisinin hem miktarını hem de kalitesini dikkate alan Fermatean bulanık sayılarla çok kriterli karar verme için termodinamik bir yöntem önermektedir. Günümüz iş dünyasında, işletmelerde güçlü büyük veri yeteneklerine olan talep artmış, tedarik zincirlerinden önemli içgörülerin derinlemesine analizini ve çıkarılmasını kolaylaştırarak veri odaklı, dinamik karar vermeyi desteklemiştir. Bu çalışmada, üretim tedarik zincirlerinde büyük veri yeteneklerini değerlendirmek için titiz bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Fermatean bulanık kümeler, Karar destek sistemleri, Büyük veri yetenekleri, Termodinamik, Tedarik zincirleri.*

A thermodynamic method for the Fermatean fuzzy decision support system to analyze big data capabilities in supply chains

ABSTRACT

Thermodynamics has a knowledge structure to effectively depict the stability (or instability) of a system. Considering the increasing complexity of application problems and the fuzzy nature of human thought, Fermatean fuzzy sets have become a powerful tool for modeling uncertainty. To better address multi-criteria decision-making problems in a Fermatean fuzzy environment, the paper first proposes a thermodynamic method for multi-criteria decision-making with Fermatean fuzzy numbers, which considers both the quantity and quality of decision information. In the contemporary business landscape, the demand for robust big data capabilities within enterprises has surged, facilitating in-depth analysis and extraction of crucial insights from supply chains to bolster data-driven, dynamic decision-making. In this study, a meticulous evaluation system is developed to assess the capabilities of big data in manufacturing supply chains.

Keywords: *Fermatean fuzzy sets, Decision support systems, Big data capabilities, Thermodynamics, Supply chains.*

I. INTRODUCTION

In today's globally competitive environment, supply chain management plays a critical role in enabling businesses to achieve sustainable success. Supply chains require the integrated management of production, storage, and logistics processes, from the procurement of raw materials to the delivery of the final product to the customer. Particularly with the development of the Internet of Things (IoT), sensor technologies, and digital infrastructures, supply chains have become complex systems generating large amounts of data. This necessitates the effective use of big data analytics in supply chain processes.

Big data enables businesses to uncover previously unnoticed patterns, optimize processes, and make data-driven strategic decisions. However, effectively evaluating and managing big data capabilities is a complex decision-making problem involving numerous criteria and uncertainties. The subjective nature of human judgments and uncertainties in evaluations, in particular, render classical decision-making approaches insufficient.

In this context, fuzzy set theory and its advanced extensions stand out as important tools in modeling uncertainty. Fermatean fuzzy sets, developed in recent years, offer an effective approach to multi-criteria decision-making problems by allowing decision-makers to express their hesitations more flexibly and robustly. However, a significant portion of current studies focuses solely on the quantity of decision information, failing to adequately consider its quality.

The thermodynamic approach, on the other hand, provides a powerful theoretical framework that can address both quantitative and qualitative dimensions through concepts such as energy, exergy, and entropy to analyze system stability. Integrating this approach into decision-making processes enables a more holistic evaluation of alternative performance. However, the literature shows a limited number of thermodynamic-based decision-making methods in Fermatean fuzzy environments.

This study proposes a new thermodynamic-based method for multi-criteria decision-making problems under Fermatean fuzzy numbers to fill this gap. The proposed approach ensures more reliable and consistent results by considering both the quantity (energy) and quality (exergy and entropy) of decision information. Furthermore, within the scope of this study, a comprehensive criteria structure for evaluating big data capabilities in production supply chains was established, and the method's effectiveness was demonstrated through a real-world application.

Accordingly, the main objective of this study is to develop an integrated decision support system that can evaluate big data capabilities in supply chains, effectively model uncertainties, and improve decision quality.

II. PRELİMİNARİES

Definition 1. Let E be the universal set. The FFS is defined as the set $F = \{(x, \mu_F(x), \vartheta_F(x)) : x \in E\}$, where with $0 \leq \mu_F^3 + \vartheta_F^3 \leq 1$ and $\mu_F, \vartheta_F \in [0,1]$. The hesitation degree has been shown with $h_F = \sqrt[3]{1 - \mu_F^3 - \vartheta_F^3}$.

Consider the three FFSs $F = (\mu_F, \vartheta_F)$, $F_1 = (\mu_{F1}, \vartheta_{F1})$, $F_2 = (\mu_{F2}, \vartheta_{F2})$. Then,

$$F_1 \cap F_2 = \{min(\mu_{F1}, \mu_{F2}), max(\vartheta_{F1}, \vartheta_{F1})\},$$

$$F_1 \cup F_2 = \{max(\mu_{F1}, \mu_{F2}), min(\vartheta_{F1}, \vartheta_{F1})\},$$

$$F^c = (\vartheta_F, \mu_F),$$

$$F_1 \oplus F_2 = \left(\sqrt[3]{\mu_{F1}^3 + \mu_{F2}^3 - \mu_{F1}^3\mu_{F2}^3}, \vartheta_{F1}\vartheta_{F2}\right),$$

$$F_1 \otimes F_2 = \left(\mu_{F1}\mu_{F2}, \sqrt[3]{\vartheta_{F1}^3 + \vartheta_{F2}^3 - \vartheta_{F1}^3\vartheta_{F2}^3}\right),$$

$$\gamma F = \left(\sqrt[3]{1 - (1 - \mu_1^3)^\gamma}, \vartheta_1^\gamma\right),$$

$$F^\gamma = \left(\mu_1^\gamma, \sqrt[3]{1 - (1 - \vartheta_1^3)^\gamma}\right),$$

$$F_1 \ominus F_2 = \left(\mu_1\vartheta_1, \sqrt[3]{\vartheta_1^3 + \mu_1^3 - \vartheta_1^3\mu_1^3}\right),$$

For two FFS, the Euclidean distance is defined as

$$d(F_1, F_2) = \sqrt{\frac{1}{2}[(\mu_1^3 - \mu_2^3)^2 + (\vartheta_1^3 - \vartheta_2^3)^2 - (\pi_1^3 - \pi_2^3)^2]}.$$

For the FFS F, the score, accuracy, and normalized score functions are defined by

$$SC(F) = \frac{1}{2}(\mu_F^3 - \vartheta_F^3), \quad (1)$$

$$AC(F) = \frac{1}{2}(\mu_F^3 + \vartheta_F^3), \quad (2)$$

$$\overline{SC}(F) = \frac{1}{2}(SC(F) + 1) \quad (3)$$

III. THERMODYNAMİCS DECİSİON-MAKİNG METHOD

A. Description

The Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) problem with Fermatean Fuzzy Numbers (FFNs) involves selecting the most desirable alternative from a set of options based on multiple criteria, each evaluated under uncertainty and fuzziness represented by FFNs. Mathematically, the MCDM problem with FFNs can be specified as follows:

Given:

- A set of alternatives $A = \{A_i : i = 1,2, \dots, m\}$,
- A set of criteria $C = \{C_j : j = 1,2, \dots, n\}$,
- Weights for each criterion by the experts k $w = \{w_1^k, \cdots, w_n^k\}^T$, *where* w_j^k (j=1,2,...,n; k=1,...,l) and $\sum_{j=1}^{n} w_j^k = 1$,
- A decision matrix $D^k = \left(d_{ij}^k\right)_{m\times n}$, where each $\left(d_{ij}^k\right)$ *is a Fermatean fuzzy number representing the evaluation of alternative* A_i under criterion C_j.

$$D^k = \left(d_{ij}^k\right)_{m\times n} = \begin{pmatrix} (\mu_{11}^k, \vartheta_{11}^k) & (\mu_{12}^k, \vartheta_{12}^k) & \dots & (\mu_{1n}^k, \vartheta_{1n}^k) \\ (\mu_{21}^k, \vartheta_{21}^k) & (\mu_{22}^k, \vartheta_{22}^k) & \cdots & (\mu_{2n}^k, \vartheta_{2n}^k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1}^k, \vartheta_{m1}^k) & (\mu_{m2}^k, \vartheta_{m2}^k) & \cdots & (\mu_{mn}^k, \vartheta_{mn}^k) \end{pmatrix} \quad (4)$$

B. Proposed Method

Definition 1. Decision potential (r) represents the "potential energy" or strength of an alternative with respect to a specific criterion. This potential is quantified by the criterion value assigned to that alternative.

Definition 2. Decision force (ω) is the weight assigned to a criterion.

For example, if an expert assesses an object with respect to a criterion as (0.73, 0.42), and the weight of the criterion is 0.318, then the decision potential and the decision force of the object are (0.73, 0.42) and 0.318, respectively.

In other words, the decision potential encapsulates how well an alternative performs with respect to a given criterion, and the potentials across all criteria help determine the alternative's overall desirability.

Based on this information, we can define the decision energy of an alternative as follows:

Definition 3. Decision energy is a property of an alternative, which expresses energy that the alternative possesses in the system, which relates to its decision potential and the corresponding decision force:

$$E = \omega r \quad (2)$$

For example, for (0.73, 0.42) and 0.318, $E = 0.318 \otimes (0.73, 0.42) = \left(\sqrt[3]{1-(1-0.73^3)^{0.318}}, 0.42^{0.318}\right) = (0.525, 0.759)$.

Decision energy measures the quantity of decision information.

Definition 4. A system's decision work when it transitions from state r_1 to state r_2 is represented as follows:

$$W = \omega d(r_1, r_2) \quad (3)$$

In this equation, $d(r_1, r_2)$ is the distance between the decision potentials of two states, r_1 and r_2.

To depict the quality of decision potentials to increase the dependability of the decision-making results, we will introduce some concepts below:

Definition 5. The quality of a decision potential for expert k is measured by its similarity to the mean decision potential across all experts:

$$Q_k = 1 - \frac{d(r_k, \bar{r})}{d(r_k, \bar{r}) + d(r_k^c, \bar{r})} \quad (4)$$

In (4), r_i^c is the complement of r_i, and $\bar{r}$ is the mean decision potential computed by the FFWA operator.

Definition 6. Decision exergy is the maximal effectiveness of decision potentials, which is expressed as:

$$B = QE \quad (5)$$

The quality of choice potentials can be assessed using decision exergy. It can explain the outcome of a sequence of decision potentials while accounting for their distribution. Given that entropy is frequently used to illustrate a system's quality from the perspective of its instability, we define decision entropy in the following terms based on the relationship between exergy and entropy:

Definition 7. The unevenness of an alternative's decision potentials is measured using decision entropy, which is expressed as:

$$S = E \ominus B \quad (6)$$

C. Algorithm Steps

Step 1: Identify the alternatives A_i (I=1,2,...,m) and the criteria C_j (j=1,2,...,n) of the MCDM problem, and invite the experts U_k (k=1,2,...,l) to assess the alternatives by the Fermatean fuzzy decision matrices $D^k = \left(d_{ij}^k\right)_{m\times n}$ provided by the experts, which can be expressed as (4).

Step 2: Ask the experts U_k (k=1,2,...,l) to determine the weights of the criteria and then obtain $\omega_j^{k,}$ which indicates that the k[th] expert assigns the weight ω_j^k to the j[th] criterion.

Step 3: Compute the decision-energy matrix E^k for each expert using Equation 2.

Step 4: Construct the quality matrix Q^k of each expert.

Step 5: Build the decision exergy matrices $B^k = \left[Q_{ij}^k, E_{ij}^k\right]_{m\times n}$ of all the experts.

Step 6: Obtain the averaging decision energy and the averaging decision exergy of the i[th] alternative about the k[th] expert:

$$\bar{E}_i^k = \frac{1}{n}\left(E_{i1}^k + E_{i2}^k + \cdots + E_{in}^k\right) \quad (7)$$

$$\bar{B}_i^k = \frac{1}{n}\left(B_{i1}^k + B_{i2}^k + \cdots + B_{in}^k\right) \quad (8)$$

Step 7: Calculate the decision energy and the decision exergy of each alternative:

$$E_i = \frac{1}{k}\left(E_i^1 + E_i^2 + \cdots + E_i^l\right) \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{k}\left(B_i^1 + B_i^2 + \cdots + B_i^l\right) \quad (10)$$

Step 8: Determine the decision entropy of each alternative:

$$S_i = E_i \ominus B_i \quad (11)$$

Step 9: Obtain the scores of each decision entropy s(S_i), and then rank the alternatives. The lower the decision entropy score, the better the alternative.

IV. Analyzing Big Data Capabilities in Supply Chains

To determine the capabilities required for the successful implementation of Big Data in supply chains, a literature review was conducted, and four criteria and 16 sub-criteria were identified. Assistance was obtained from the Istanbul Chamber of Commerce (ITO) regarding supply chain firms, and four ITO-registered firms (B_1, B_2, B_3, B_4) that had successfully implemented big data capabilities and were also very interested in evaluating them were selected.

Criteria:

A_1 - Big Data Processing Capability; A_2 - Big Data Organization Capability; A_3 - Big Data Talent Capability; A_4 - Big Data Environmental Assessment Capability.

Sub-criteria:

A_{11} - Pre-processing; A_{12} - Storage and management; A_{13} - Data protection; A_{14} - Deep analysis.

A_{21} - Strategic sensing; A_{22} - Top management support; A_{23} - Culture cultivation; A_{24} - Organizational learning; A_{25} - IT Infrastructure.

A_{31} - Team cooperation; A_{32} - Technical expertise; A_{33} - Business experience; A_{34} - Technical management knowledge.

A_{41} - Return on investment; A_{42} - Government regulation; A_{43} - Market turbulence.

In this case analysis, three experts U_k (k = 1, 2, 3) were invited, each with equal weight.

Experts have given the weight vector of these sub-criteria as:

$$\omega = \left\{\begin{matrix}0.0626,\ 0.0798,\ 0.0571,\ 0.0743,\ 0.0556,\ 0.0485,\ 0.0339,\ 0.0514,\ 0.0663,\ 0.0743,\ 0.0562\\ 0.0634,\ 0.0762,\ 0.0847,\ 0.0729,\ 0.0458\end{matrix}\right\}^T \quad (7)$$

The FFNs corresponding to the experts' linguistic evaluations are presented in Table 1.

Table 1. Linguistic terms

Linguistic Terms	**FFNs**
Extremely preferable (EF)	[1.00, 0.00]
Very very preferable (VVP)	[0.90, 0.20]
Very preferable (VP)	[0.85, 0.30]
Medium preferred (MP)	[0.70, 0.45]
Medium (M)	[0.65, 0.55]
Medium Un-preferable (MUP)	[0.55, 0.70]
Un-preferable (UP)	[0.40, 0.80]
Very Un-preferable (VUP)	[0.30, 0.85]

Very very Unpreferable (VVUP)	[0.10, 0.95]

The thermodynamic method for MCDM with FFNs is a suitable approach to support the hierarchical medical system. The judgments are represented by FFNs, which fully capture the uncertainty of the objects. Then, the decisions based on the evaluations given by the three experts are shown in the Fermatean fuzzy decision matrices as follows (Table 2).

Table 2. Fermatean fuzzy decision matrix with respect to three experts

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_{11}	(UP, VUP, UP)	(MP, VP, VP)	(VP, MP, MUP)	(EF, VVP, VVP)
A_{12}	(MP, MP, M)	(M, MP, VVUP)	(MP, MP, VP)	(VVP, VVP, MUP)
A_{13}	(VUP, VVUP, MUP)	(M, MUP, MUP)	(MUP, M, MUP)	(M, VP, VP)
A_{14}	(UP, MUP, UP)	(UP, UP, MP)	(M, M, M)	(MP, M, MUP)
A_{21}	(VUP, UP, VVUP)	(VUP, VUP, VVUP)	(M, VP, MP)	(M, M, MP)
A_{22}	(EF, EF, EF)	(VP, VVP, M)	(UP, VVUP, VUP)	(M, VP, UP)
A_{23}	(VP, VVP, MP)	(MP, VP, MUP)	(M, MP, M)	(MP, VP, VP)
A_{24}	(MP, VVP, M)	(M, MP, M)	(VVP, M, MP)	(M, VP, M)
A_{25}	(VP, VVP, M)	(UP, VVUP, UP)	(UP, UP, VUP)	(MP, M, M)
A_{31}	(EF, EF, EF)	(VP, VVP, M)	(VP, M, VP)	(M, MP, VVP)
A_{32}	(VUP, VUP, UP)	(M, VUP, M)	(MP, MP, VP)	(VVP, VVP, VVP)
A_{33}	(EF, EF, EF)	(EF, M, VVP)	(MP, VVP, M)	(MP, VP, M)
A_{34}	(VP, VVP, MP)	(UP, VUP, MUP)	(VP, VVP, M)	(VP, VP, M)
A_{41}	(VVP, EF, VP)	(MP, MP, M)	(M, MP, MP)	(VP, EF, VP)
A_{42}	(MP, VVP, VVP)	(MP, VP, M)	(VP, M, VP)	(VVP, VP, VVP)
A_{43}	(MP, VP, M)	(M, MP, MUP)	(MP, VP, M)	(M, M, MP)

The decision energy matrix of all the experts in Table 3 using weights (7) and Table 2.

Table 3. Decision energy matrix E for three experts

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_{11}	[(0.16,0.99), (0.12, 0.99), (0.16, 0.99)]	[(0.30,0.95), (0.39, 0.93), (0.39, 0.93)]	[(0.39,0.93), (0.30, 0.95), (0.30, 0.95)]	[(1.00,0.00), (0.43, 0.90), (0.43, 0.90)]
A_{12}	[(0.32,0.94), (0.32, 0.94), (0.30, 0.95)]	[(0.30,0.95), (0.32, 0.94), (0.04, 0.99)]	[(0.32,0.94), (0.32, 0.94), (0.42, 0.91)]	[(0.04, 0.99), (0.04,0.99), (0.24, 0.97)]
A_{13}	[(0.12,0.99), (0.04, 0.99), (0.22, 0.98)]	[(0.26,0.97), (0.22, 0.98), (0.22, 0.98)]	[(0.22,0.98), (0.26, 0.97), (0.22, 0.98)]	[(0.26,0.97), (0.38, 0.93), (0.38, 0.93)]
A_{14}	[(0.17,0.98), (0.24, 0.97), (0.17, 0.97)]	[(0.17,0.97), (0.17, 0.97), (0.31, 0.94)]	[(0.29,0.96), (0.29, 0.96), (0.29, 0.96)]	[(0.31,0.94), (0.19, 0.96), (0.24, 0.97)]
A_{21}	[(0.11,0.99), (0.15, 0.99), (0.04, 0.99)]	[(0.11,0.99), (0.11, 0.99), (0.04, 0.99)]	[(0.26,0.97), (0.37, 0.94), (0.28, 0.96)]	[(0.26,0.97), (0.26, 0.97), (0.28, 0.96)]
A_{22}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(0.36,0.94), (0.40, 0.92), (0.25, 0.97)]	[(0.15,0.99), (0.04, 0.99), (0.11, 0.99)]	[(0.25,0.97), (0.36, 0.94), (0.15, 0.99)]
A_{23}	[(0.32,0.96), (0.35, 0.95), (0.24, 0.97)]	[(0.24,0.97), (0.32, 0.96), (0.18, 0.99)]	[(0.22,0.98), (0.24, 0.97), (0.22, 0.98)]	[(0.24,0.97), (0.32, 0.94), (0.32, 0.96)]
A_{24}	[(0.28,0.96), (0.40, 0.92), (0.25, 0.97)]	[(0.25,0.97), (0.28, 0.96), (0.25, 0.97)]	[(0.40,0.92), (0.25, 0.97), (0.28, 0.96)]	[(0.25,0.97), (0.36, 0.94), (0.25, 0.97)]
A_{25}	[(0.40,0.92), (0.44, 0.90), (0.28, 0.96)]	[(0.16,0.99), (0.04, 0.99), (0.16, 0.99)]	[(0.16,0.99), (0.16, 0.99), (0.12, 0.99)]	[(0.30,0.95), (0.28, 0.96), (0.28, 0.96)]
A_{31}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(0.41,0.91), (0.45, 0.89), (0.29, 0.96)]	[(0.41,0.91), (0.29, 0.96), (0.41, 0.91)]	[(0.29,0.96), (0.31, 0.94), (0.45, 0.89)]
A_{32}	[(0.12,0.99), (0.12, 0.99), (0.15, 0.99)]	[(0.26,0.97), (0.12, 0.99), (0.26, 0.97)]	[(0.29,0.96), (0.29, 0.96), (0.37, 0.93)]	[(0.41,0.91), (0.41, 0.91), (0.41, 0.91)]

A_{33}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(1.00,0.00), (0.27, 0.96), (0.43, 0.90)]	[(0.30,0.95), (0.43, 0.90), (0.27, 0.96)]	[(0.30,0.95), (0.39, 0.93), (0.27, 0.96)]
A_{34}	[(0.41,0.91), (0.46, 0.88), (0.29, 0.96)]	[(0.17,0.98), (0.12, 0.99), (0.24, 0.97)]	[(0.41,0.91), (0.46, 0.88), (0.29, 0.96)]	[(0.41,0.91), (0.41, 0.91), (0.29, 0.96)]
A_{41}	[(0.47,0.87), (1.00, 0.00), (0.43, 0.90)]	[(0.33,0.93), (0.33, 0.93), (0.30, 0.95)]	[(0.30,0.95), (0.33, 0.93), (0.33, 0.93)]	[(0.43,0.90), (1.00, 0.00), (0.43, 0.90)]
A_{42}	[(0.28,0.96), (0.45, 0.89), (0.45, 0.89)]	[(0.28,0.96), (0.41, 0.92), (0.28, 0.96)]	[(0.41,0.92), (0.28, 0.96), (0.41, 0.92)]	[(0.45,0.89), (0.41, 0.92), (0.45, 0.89)]
A_{43}	[(0.27,0.96), (0.40, 0.95), (0.24, 0.97)]	[(0.24,0.97), (0.27, 0.96), (0.20, 0.98)]	[(0.27,0.96), (0.40, 0.95), (0.24, 0.97)]	[(0.24,0.97), (0.24, 0.97), (0.27, 0.96)]

Based on the decision energy matrices, the mean decision energy of all the experts can be obtained as:

$$\bar{r_1} = \begin{Bmatrix} (1.00, 0.00), (0.29, 0.95), (0.23, 0.98), (0.25, 0.96), (0.21, 0.98), (1.00, 0.00), (0.26, 0.97), (0.31, 0.95), \\ (0.29, 0.96), (1.00, 0.00), (0.31, 0.96), (1.00, 0.00), (0.38, 0.93), (0.40, 0.91), (0.37, 0.93), (0.26, 0.96) \end{Bmatrix}$$

$$\bar{r_2} = \begin{Bmatrix} (0.35, 0.94), (0.29, 0.95), (0.28, 0.97), (0.23, 0.96), (0.26, 0.97), (1.00, 0.00), (0.31, 0.95), (0.33, 0.95), \\ (0.31, 0.96), (1.00, 0.00), (0.29, 0.96), (1.00, 0.00), (0.41, 0.91), (1.00, 0.00), (0.40, 0.92), (0.34, 0.96) \end{Bmatrix}$$

$$\bar{r_3} = \begin{Bmatrix} (0.35, 0.94), (0.31, 0.95), (0.28, 0.97), (0.26, 0.96), (0.22, 0.97), (1.00, 0.00), (0.25, 0.97), (0.26, 0.97), \\ (0.23, 0.97), (1.00, 0.00), (0.33, 0.95), (1.00, 0.00), (0.28, 0.96), (0.38, 0.92), (0.41, 0.91), (0.24, 0.97) \end{Bmatrix}$$

Then, the quality matrices of three experts are established as follows (Table 4):

Table 4. The matrix Q for three experts

	B_1	**B_2**	**B_3**	**B_4**
A_{11}	[0.361, 0.762, 0.693]	[0.563, 0.238, 0.238]	[0.696, 0.420, 0.567]	[1.000, 0.139, 0.139]
A_{12}	[0.417, 0.417, 0.465]	[0.465, 0.417, 0.966]	[0.431, 0.430, 0.275]	[0.151, 0.151, 0.566]
A_{13}	[0.715, 0.926, 0.559]	[0.469, 0.559, 0.559]	[0.555, 0.468, 0.559]	[0.469, 0.278, 0.278]
A_{14}	[0.673, 0.564, 0.673]	[0.564, 0.564, 0.421	[0.466, 0.465, 0.466]	[0.421, 0.466, 0.564]
A_{21}	[0.717, 0.661, 0.936]	[0.717, 0.722, 0.936]	[0.468, 0.278, 0.424]	[0.468, 0.468, 0.424]
A_{22}	[1.000, 1.000, 1.000]	[0.696, 0.767, 0.529]	[0.362, 0.130, 0.303]	[0.529, 0.696, 0.362]
A_{23}	[0.278, 0.150, 0.429]	[0.429, 0.278, 0.560]	[0.468, 0.422, 0.467]	[0.429, 0.278, 0.278]
A_{24}	[0.422, 0.152, 0.464]	[0.465, 0.422, 0.464]	[0.151, 0.465, 0.417]	[0.465, 0.253, 0.404]
A_{25}	[0.262, 0.175, 0.466]	[0.670, 0.856, 0.673]	[0.670, 0.664, 0.745]	[0.421, 0.466, 0.466]
A_{31}	[1.000, 1.000, 1.000]	[0.700, 0.770, 0.529]	[0.700, 0.529, 0.700]	[0.529, 0.563, 0.770]
A_{32}	[0.738, 0.466, 0.679]	[0.466, 0.738, 0.465]	[0.421, 0.421, 0.253]	[0.175, 0.322, 0.152]
A_{33}	[1.000, 1.000, 1.000]	[1.000, 0.529, 0.770]	[0.563, 0.770 0.529]	[0.563, 0.700, 0.529]
A_{34}	[0.231, 0.101, 0.425]	[0.422, 0.802, 0.559]	[0.231, 0.101, 0.457]	[0.231, 0.198, 0.457]
A_{41}	[0.090, 1.000, 0.209]	[0.408, 0.563, 0.460]	[0.458, 0.563, 0.411]	[0.195, 1.000, 0.209]
A_{42}	[0.415, 0.111, 0.101]	[0.415, 0.221, 0.458]	[0.402, 0.460, 0.198]	[0.119, 0.221, 0.101]
A_{43}	[0.421, 0.272, 0.468]	[0.466, 0.426, 0.560]	[0.421, 0.272, 0.468]	[0.466, 0.471, 0.429]

Obtain the exergy matrix $B = QE$ of all the experts.

Table 5. The matrix B for three experts

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_{11}	[(0.12,0.99), (0.11, 0.99), (0.14, 0.99)]	[(0.25,0.97), (0.19, 0.98), (0.24, 0.98)]	[(0.35,0.95), (0.23, 0.98), (0.25, 0.97)]	[(1.00,0.00), (0.23, 0.99), (0.23, 0.90)]
A_{12}	[(0.24,0.97), (0.24, 0.97), (0.23, 0.98)]	[(0.23,0.95), (0.24, 0.97), (0.04, 0.99)]	[(0.24,0.97), (0.24, 0.97), (0.28, 0.97)]	[(0.02, 0.99), (0.02,0.99), (0.20, 0.98)]
A_{13}	[(0.11,0.99), (0.04, 0.99), (0.18, 0.99)]	[(0.20,0.99), (0.21, 0.98), (0.18, 0.99)]	[(0.18,0.99), (0.20, 0.99), (0.18, 0.99)]	[(0.20,0.99), (0.25, 0.98), (0.25, 0.98)]
A_{14}	[(0.25,0.99), (0.20, 0.98), (0.15, 0.98)]	[(0.14,0.98), (0.14, 0.98), (0.23, 0.97)]	[(0.23,0.98), (0.23, 0.98), (0.23, 0.98)]	[(0.23,0.97), (0.15, 0.98), (0.20, 0.98)]
A_{21}	[(0.10,0.99), (0.13, 0.99), (0.04, 0.99)]	[(0.10,0.99), (0.10, 0.99), (0.04, 0.99)]	[(0.20,0.98), (0.24, 0.98), (0.21, 0.98)]	[(0.20,0.98), (0.20, 0.98), (0.21, 0.98)]
A_{22}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(0.32,0.96), (0.37, 0.94), (0.20, 0.98)]	[(0.11,0.99), (0.02, 0.98), (0.07, 0.98)]	[(0.20,0.98), (0.20, 0.98), (0.21, 0.98)]
A_{23}	[(0.21,0.99), (0.19, 0.99), (0.18, 0.99)]	[(0.18,0.99), (0.21, 0.99), (0.15, 0.99)]	[(0.18,0.99), (0.18, 0.99), (0.17, 0.99)]	[(0.18,0.94), (0.21, 0.98), (0.21, 0.99)]
A_{24}	[(0.21,0.98), (0.22, 0.99), (0.20, 0.99)]	[(0.20,0.99), (0.21, 0.98), (0.19, 0.99)]	[(0.21,0.99), (0.19, 0.99), (0.21, 0.98)]	[(0.20,0.99), (0.23, 0.98), (0.19, 0.99)]
A_{25}	[(0.26,0.98), (0.25, 0.98), (0.22, 0.98)]	[(0.14,0.99), (0.03, 0.99), (0.14, 0.99)]	[(0.14,0.99), (0.14, 0.99), (0.11, 0.99)]	[(0.23,0.98), (0.22, 0.98), (0.22, 0.98)]
A_{31}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(0.37,0.94), (0.41, 0.91), (0.23, 0.95)]	[(0.37,0.94), (0.23, 0.98), (0.37, 0.94)]	[(0.23,0.98), (0.26, 0.97), (0.41, 0.91)]
A_{32}	[(0.11,0.99), (0.10, 0.99), (0.13, 0.99)]	[(0.20,0.99), (0.11, 0.99), (0.20, 0.99)]	[(0.22,0.98), (0.22, 0.98), (0.24, 0.98)]	[(0.23,0.98), (0.28, 0.98), (0.22, 0.99)]
A_{33}	[(1.00,0.00), (1.00, 0.00), (1.00, 0.00)]	[(1.00,0.00), (0.22, 0.98), (0.40, 0.92)]	[(0.25,0.97), (0.40, 0.92), (0.22, 0.98)]	[(0.25,0.97), (0.35, 0.95), (0.22, 0.98)]
A_{34}	[(0.25,0.92), (0.22, 0.99), (0.22, 0.98)]	[(0.13,0.99), (0.11, 0.99), (0.20, 0.98)]	[(0.25,0.98), (0.22, 0.99), (0.22, 0.98)]	[(0.25,0.98), (0.24, 0.98), (0.22, 0.98)]
A_{41}	[(0.21,0.99), (1.00, 0.00), (0.26, 0.98)]	[(0.25,0.97), (0.27, 0.96), (0.23, 0.98)]	[(0.23,0.98), (0.27, 0.97), (0.25, 0.97)]	[(0.25,0.98), (1.00, 0.00), (0.26, 0.98)]
A_{42}	[(0.21,0.98), (0.22, 0.99), (0.21, 0.98)]	[(0.21,0.98), (0.25, 0.98), (0.22, 0.98)]	[(0.30,0.97), (0.22, 0.98), (0.24, 0.98)]	[(0.22,0.99), (0.25, 0.98), (0.21, 0.99)]
A_{43}	[(0.22,0.98), (0.20, 0.99), (0.26, 0.99)]	[(0.19,0.99), (0.20, 0.98), (0.16, 0.99)]	[(0.20,0.98), (0.26, 0.99), (0.19, 0.99)]	[(0.19,0.99), (0.19, 0.99), (0.200, 0.98)]

Using Equations (7)–(11), the decision-making results can be listed in Table 6. A lower decision entropy indicates a better condition for the firm. Thus, the conditions of firms can be ranked in Table 6, and the firms can be classified accordingly.

Table 6. The decision-making results

	Decision Energy	Decision Exergy	Decision Entropy	Ranking
B_1	(0.1476, 0.6811)	(0.1125, 0.7038)	(0.0185, 0.8603)	3
B_2	(0.1525, 0.6644)	(0.1266, 0.6961)	(0.0160, 0.8644)	**1**
B_3	(0.1834, 0.6313)	(0.1403, 0.6855)	(0.0172, 0.8454)	2
B_4	(0.1122, 0.7270)	(0.0842, 0.7406)	(0.0236, 0.8294)	4

V. CONCLUSİON

The knowledge structure of thermodynamics provides a useful tool for depicting the stability (or instability) of a system, while FFNs can comprehensively describe the uncertainty of objects. In this paper, we have proposed a thermodynamic method for MCDM with FFNs, which is highly effective by considering both the quantity and quality of decision information in the decision-making process. To implement the proposed method, a real-world study was conducted. To validate the comprehensiveness and reliability of the new method, and to verify the comprehensiveness and reliability of the proposed thermodynamic method for MCDM with FFNs, applications were performed on four companies using these criteria.

KAYNAKLAR

[1] X. Feng, J. Qiu, and C. Wei "Assessing big data capabilities in manufacturing supply chains: a Pythagorean fuzzy MAGDM framework". *International Journal of Fuzzy Systems*, *27*(4), 1279-1302, 2025.

[2] J. Jiang, X. Liu, Z. Wang, W. Ding, and S. Zhang "Large group emergency decision-making with bi-directional trust in social networks: A probabilistic hesitant fuzzy integrated cloud approach", *Information Fusion*, 102, 102062, 2024.

[3] M. B. Kandemir "Agile Decision-Making in Unstable Markets: A Soft Set Paradigm with Temporal Weighting," *Universal Journal of Mathematics and Applications*, 9(1), 32-43, 2026.

[4] M. Kirisci "Measures of distance and entropy based on the Fermatean fuzzy-type soft sets approach," *Universal Journal of Mathematics and Applications*, *7*(1), 12-29, 2024.

[5] M. Kirisci "Medical waste management based on an interval-valued Fermatean fuzzy decision-making method," *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*, *7*(3), 128-145, 2024.

[6] *D.*Li, C. Liu, and W. Gan "A new cognitive model: Cloud model," *International Journal of Intelligent Systems*, 24(3), 357-375, 2009.

[7] Q. Li, Q. Y. Chen, Z. Liu, and H.C. Liu "Public transport customer satisfaction evaluation using an extended thermodynamic method: a case study of Shanghai, China," *Soft Computing*, *25*(16), 10901-10914, 2021.

[8] Y. Liu, Y. Wang, M. Xu, and G. Xu "Emergency alternative evaluation using extended trapezoidal intuitionistic fuzzy thermodynamic approach with prospect theory", *International Journal of Fuzzy Systems*, (6), 1801-1817, 2019.

[9] F. Tuğrul and M. Citil. "Application of mathematical modeling in multi-criteria decision-making process: intuitionistic fuzzy PROMETHEE", *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*, *5*(2), 48-56, 2022.

[10] S. Milles, E. Nart, F. Ismail, F. and A. Latreche "Construction of Intuitionistic Fuzzy Mappings with Applications", *Universal Journal of Mathematics and Applications,* 3(4), 144-155, 2020.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Aralık değerli Fermatean bulanık sayılar için yeni bir sıralama yöntemi ve üç yönlü bir karar modeli

Murat Kirişci[a], Mahmut Akyiğit[b]*

[a] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Biyoistatistik ve Tıp Bilişimi Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[b] Sakarya Üniversitesi, Matematik Bölümü, Sakarya/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: murat.kirisci@iuc.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, aralık değerli Fermatean bulanık ortamlarda üç yönlü bir karar modeli önermekte ve aralık değerli Fermatean bulanık sayılar için yeni bir sıralama yöntemi geliştirmektedir. Yeni önerilen sıralama yönteminin temel özellikleri incelenmiştir. İlgili aralık değerli Fermatean bulanık üç yönlü karar kurallarını oluşturmak için koşullu olasılık eşikleri türetilmiştir. Ayrıca, aralık değerli Fermatean bulanık ortamlarda çok nitelikli karar verme problemlerini çözmek için pratik bir üç yönlü karar algoritması sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Aralık değerli Fermatean bulanık kümeler, Üç yönlü karar, Sıralama metodu, Çok kriterli karar verme.*

A novel ranking method and a three-way decision model for interval-valued Fermatean fuzzy numbers

ABSTRACT

This study proposes a three-way decision model in interval-valued Fermatean fuzzy environments and develops a novel ranking method for interval-valued Fermatean fuzzy numbers. The fundamental properties of the newly proposed ranking method are examined. Conditional probability thresholds are derived to construct the relevant interval-valued Fermatean fuzzy three-way decision rules. Furthermore, a practical three-way decision algorithm is presented for solving multi-attribute decision-making problems in interval-valued Fermatean fuzzy environments.

Keywords: *Interval-valued Fermatean fuzzy sets, Three-way decision, Ranking method, Multi-criteria decision-making.*

I. INTRODUCTİON

The three-way decision model is a powerful approach, particularly used in decision-making problems under uncertainty. It expands on the classic binary decision structure (acceptance/rejection) by adding a third option: deferment/non-commitment.

While traditional decision-making involves "Acceptance" and "Rejection," the three-way decision model includes "Acceptance (Positive region)," "Rejection (Negative region)," and "Deferment/Boundary region." This third region represents situations where the decision-maker lacks sufficient information.

When we examine its mathematical basis, we see that the model is based on Rough Set Theory. For a universal set U and a target set X, the "Positive Region (POS): Those that definitely belong to X"; "Negative Region (NEG): Those that definitely do not belong to X"; "Boundary Region (BND): Those that are undecided".

Decision rules (threshold-based) are generally dependent on two threshold values: "α, acceptance threshold"; "β, rejection threshold". For a probability or membership value PR(x), it is expressed as: "PR(x) > α if ACCEPT"; "PR(x) < β if REJECT"; "β < PR(x) < α if NON-COMMITMENT".

From a decision theory perspective, the three-way decision model is also related to Bayesian Decision Theory. A cost (loss function) is defined for each decision: This function includes "cost of wrong acceptance,"

"cost of wrong rejection," and "cost of postponement." The aim here is to minimize the total expected risk. The model's key advantages are its more realistic management of uncertainty, risk-based decision-making, and flexibility and extensibility. Essentially, the three-way decision model states: "If there is not enough information to make a decision, do not make one." This approach offers a more cautious, rational, and realistic structure compared to classical decision models.

In short, the typical Three-Way Decision (3WD) rule was formulated by combining Decision-Theoretic Rough Sets, which are based on Bayesian decision theory, with the rough set model, thereby providing a semantic interpretation of its three regions.

Rough Sets: They aim to model uncertainty in information systems, classify data, and uncover hidden patterns. Defines a concept using three disjoint regions: Positive (POS), Negative (NEG), and Boundary (BND).

Bayesian Decision Theory (Minimum-Risk): Determines the optimal action by minimizing expected costs, introducing thresholds for actions. It goes beyond simply reducing the classical error rate by accounting for the weight (risk) of incorrect decisions.

3WD Rule Synthesis: The combination allows the boundary region (BND) to be interpreted as a "non-commitment" or "deferred" decision rather than just an error, enabling more nuanced decision-making (acceptance, rejection, or deferment).

t-norms and t-conorms are generalizations of the "AND" and "OR" operations in classical logic, used in fuzzy logic and fuzzy set theory, to values between 0 and 1. They are mathematical operators that support operations on membership degrees in the range [0, 1].

t-norm (Triangular Norm): Represents the intersection operation in fuzzy sets. It is the equivalent of the "AND" operator in classical logic. Given two or more fuzzy membership degrees (x, y), it calculates their intersection value (T(x, y)). In general, T(x, y) tends to be $\leq \min(x, y)$. That is, the result is always less than or equal to the inputs.

t-conorm (or s-norm): Represents the union operation in fuzzy sets. It is the equivalent of the "OR" operator in classical logic. What does it do? Given two or more fuzzy membership degrees (x, y), it calculates their union value (S(x, y)). In general, S(x, y) tends to be $\geq \max(x, y)$. That is, the result is always greater than or equal to the inputs.

t-norms and t-conorms are used, particularly in fuzzy control systems, to combine fuzzy rules and handle degrees of membership in decision-making processes.

The IVFFS is a mathematical framework used in decision-making and modeling scenarios that involve uncertainty and imprecision. IVFFS extends traditional fuzzy sets by incorporating an additional layer of flexibility and expressiveness, particularly in cases where precise membership degrees are difficult to assign. It is beneficial in the following cases: IVFFS is often applied in multi-criteria decision-making problems where the decision criteria are imprecise or uncertain. It helps handle subjective judgments by representing degrees of membership and non-membership as intervals. When dealing with datasets that contain inherent uncertainty or incomplete information, IVFFS provides a framework for modeling and reasoning with interval-valued membership degree and non-membership degree. IVFFS is suitable for systems that rely on human input, such as expert systems or human-centric decision models. Humans often provide assessments that are uncertain or interval-based rather than precise values. In situations involving multiple stakeholders or experts, IVFFS can aggregate diverse opinions by considering interval-valued degrees of agreement and disagreement. IVFFS can model systems with ambiguous or vague operational parameters, such as those found in robotics or process control. IVFFS is utilized in applications that require robust handling of ambiguous or overlapping patterns, such as image processing or data clustering. IVFFS supports decision-making in sustainability and environmental management, where data uncertainty is prevalent.

Reasons for choosing IVFFS over other fuzzy models can be summarized as follows: IVFFS provides a more flexible structure by allowing membership degree non-membership degree, and hesitation degree to be expressed as intervals. Better suited for cases where precise membership values are unavailable. Useful in real-world problems where uncertainty is an intrinsic characteristic. When decision makers have incomplete information or doubt the accuracy of information from different sources, IVFFS provides a more flexible model. It is especially preferred when the uncertainty in expert evaluations needs to be expressed as an interval. When many criteria need to be evaluated, IVFFS offers a more flexible representation for each criterion. Working with interval values produces more realistic results when human judgments or preferences are uncertain. When information is uncertain due to a system's time-varying nature, intervals can better reflect variable conditions. IVFFS is used in fuzzy-logic-based artificial intelligence systems, intensive learning processes, and data analysis to model uncertain data. In systems that handle incomplete data, uncertainty can be expressed as interval values. IVFFS applies when uncertainties need to be expressed comprehensively in project management, financial analysis, or security risk assessment.

By combining the advantages of FFSs (which allow more extensive ranges for membership degree and non-membership degree than IFSs) and interval-valued representations, IVFFS provides a robust mathematical framework for dealing with complex uncertainty. This method enables experts to express and manage uncertainties across a broader spectrum, thereby enabling more robust and reliable decisions.

II. PRELİMİNARİES

Definition 1. A t-norm is a function T: $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ satisfying the following properties:

- Existence of neutral element: 1:T(x,1)=x;
- Monotonicity: T(x, z)≤T(y, z) for x ≤ y;
- Commutativity: T(x, y)=T(y, x);
- Associativity: T(x, T(y, z))=T(T(x,y), z).

Similarly, a t-conorm is defined as a binary operation S: $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ with S(x, 0)=x, which is also commutative, associative, and monotone. A t-conorm can be constructed by using a t-norm as T(1-x, 1-y)=1-S(x, y).

Some conventional t-norms and t-conorms are given below:

- $T_M(x,y) = min\{x,y\}, \;\; S_M(x,y) = max\{x,y\}$;
- $T_P(x,y) = xy, \;\; S_P(x,y) = x + y - xy$;
- $T_{LK}(x,y) = max\{x+y-1,0\}, \; S_{LK}(x,y) = min\{x+y,1\}$.

Definition 2. For $m_F, n_F \in [0,1]$ and $0 \leq {m_F}^3 + {n_F}^3 \leq 1$, the set $F = \{(x, m_F(x), n_F(x)) : x \in E\}$ is said to be FFS, where E is an initial set. $h_F = (1 - {m_F}^3 - {n_F}^3)^{1/3}$ shows the degree of hesitation.

Definition 3. Consider $CS[0,1]$, which is the set of all closed subintervals of the unit interval. Then, $= \{(x, m_F(x), n_F(x)) : x \in E\}$ is called IVFFS, where $m_F, n_F \in CS[0,1]$ with $0 \leq sup_x {m_F}^3 + sup_x {n_F}^3 \leq 1$.

IVFFS can also be illustrated as follows:

$$F = \{(x, [m_{FL}(x), m_{FU}(x)], [n_{FL}(x), n_{FU}(x)]) : x \in E\}.$$

Here, $0 \leq {m_{FU}}^3 + {n_{FU}}^3 \leq 1$ and $h_F = [h_{FL}, h_{FU}] = \left[(1 - {m_{FL}}^3 - {n_{FL}}^3)^{1/3}, (1 - {m_{FU}}^3 - {n_{FU}}^3)^{1/3}\right]$.

Definition 4. Let

$F = \{(x, [m_{FL}(x), m_{FU}(x)], [n_{FL}(x), n_{FU}(x)]) : x \in E\}$,

$F1 = \{(x, [m_{F1L}(x), m_{F1U}(x)], [n_{F1L}(x), n_{F1U}(x)]) : x \in E\}$,

$F2 = \{(x, [m_{F2L}(x), m_{F2U}(x)], [n_{F2L}(x), n_{F2U}(x)]) : x \in E\}$

be three IVFFNs.

T is a strict t-norm with additive generator τ, and S is the dual t-conorm of T with additive generator ζ(x)=τ(1-x). Some operations are defined as follows:

- $F^t = ([n_{FL}(x), n_{FU}(x)], [m_{FL}(x), m_{FU}(x)])$,
- $F1 \oplus F2 =$
$$\left(\left[\sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(\zeta.{m_{F1L}}^3 + \zeta.{m_{F2L}}^3\right)}, \sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(\zeta.{m_{F1U}}^3 + \zeta.{m_{F2U}}^3\right)}\right], \left[\sqrt[3]{\tau^{-1}(\tau.{n_{F1L}}^3 + \tau.{n_{F2L}}^3)}, \sqrt[3]{\tau^{-1}(\tau.{n_{F1U}}^3 + \tau.{n_{F2U}}^3)}\right]\right)$$
- $F1 \otimes F2 =$
$$\left(\left[\sqrt[3]{\tau^{-1}(\tau.{m_{F1L}}^3 + \tau.{m_{F2L}}^3)}, \sqrt[3]{\tau^{-1}(\tau.{m_{F1U}}^3 + \tau.{m_{F2U}}^3)}\right], \left[\sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(\zeta.{n_{F1L}}^3 + \zeta.{n_{F2L}}^3\right)}, \sqrt[3]{\tau^{-1}\left(\zeta.{n_{F1U}}^3 + \zeta.{n_{F2U}}^3\right)}\right]\right)$$
- $\alpha F = \left(\left[\sqrt[3]{\zeta^{-1}(\alpha.\zeta.{m_{F1L}}^3)}, \sqrt[3]{\zeta^{-1}(\alpha.\zeta.{m_{F1U}}^3)}\right], \left[\sqrt[3]{\tau^{-1}(\alpha.\tau.{n_{F1L}}^3)}, \sqrt[3]{\tau^{-1}(\alpha.\tau.{n_{F1U}}^3)}\right]\right)$,
- $F^\alpha = \left(\left[\sqrt[3]{\tau^{-1}(\alpha.\tau.{m_{F1L}}^3)}, \sqrt[3]{\tau^{-1}(\alpha.\tau.{m_{F1U}}^3)}\right], \left[\sqrt[3]{\zeta^{-1}(\alpha.\zeta.{n_{F1L}}^3)}, \sqrt[3]{\zeta^{-1}(\alpha.\zeta.{n_{F1U}}^3)}\right]\right)$.

For IVFPS $F = \{(x, [m_{FL}(x), m_{FU}(x)], [n_{FL}(x), n_{FU}(x)]) : x \in E\}$, the score, accuracy and normalized score functions are:

$$P(F) = \frac{1}{2}([{m_{FL}}^3 + {m_{FU}}^3] - [{n_{FL}}^3 + {n_{FU}}^3]),$$

$$D(F) = \frac{1}{2}([{m_{FL}}^3 + {m_{FU}}^3] + [{n_{FL}}^3 + {n_{FU}}^3]),$$

$$\bar{P}(F) = \frac{1}{2}(P(F) + 1).$$

The equation

$$IVPFWG(F1, F2, \dots Fn) = \left([\prod_{i=1}^{n} {m_{FiL}}^{wi}, \prod_{i=1}^{n} {m_{FiU}}^{wi}], \left[\sqrt[3]{1-(1-\prod_{i=1}^{n} {n_{FiL}}^{3})^{\alpha}}, \sqrt[3]{1-(1-\prod_{i=1}^{n} {n_{FiU}}^{3})^{\alpha}}\right]\right) \quad (1)$$

is called the IVFF-weighted geometric operator, where w_k is an influence weight.

The typical 3WD rule is initially formulated by combining Bayesian minimum-risk decision theory and rough sets. Assume that there are two states in $\Omega = [C, \neg C]$, where the term $\neg C$ is the complementary set of C. Three actions a_P, a_B, a_N mean that object x belongs to, may belong to, and does not belong to set C, respectively. The risk cost functions of three actions are given for states C and $\neg C$, respectively. The terms $\lambda_{PP}, \lambda_{BP}, \lambda_{NP}$ measure the losses caused by accepting, delaying, and rejecting x when $x \in C$, respectively. This implies the relation of $0 \leq \lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} < \lambda_{NP}$, since in general the risk of making a wrong decision is the greatest and the risk of making a right decision is the least $\lambda_{PN}, \lambda_{BP}, \lambda_{NP}$ are the losses caused by accepting, delaying, and rejecting x when $x \in \neg C$, respectively. Similarly, we have the relation $0 \leq \lambda_{NN} \leq \lambda_{BP} < \lambda_{NP}$.

$PR(C|x)$ $\left(PR(\neg C|x)\right)$ is defined as the conditional probability that the equivalence class of object x belongs to set C $(\neg C)$. The expected losses of taking a decision action are computed as:

$$PR(a_P|x) = PR(C|x)\lambda_{PP} + PR(\neg C|x)\lambda_{PN},$$
$$PR(a_B|x) = PR(C|x)\lambda_{BP} + PR(\neg C|x)\lambda_{BN},$$
$$PR(a_N|x) = PR(C|x)\lambda_{NP} + PR(\neg C|x)\lambda_{NN}.$$

Hence, based on Bayesian risk decision theory, the 3WD rules are formed below:

(P) $If\ PR(a_P|x) \leq PR(a_B|x)$ and $PR(a_P|x) \leq PR(a_N|x)$, then $x \in POS(C)$,

(B) $If\ PR(a_B|x) \leq PR(a_P|x)$ and $PR(a_B|x) \leq PR(a_N|x)$, then $x \in BND(C)$,

(N) $If\ PR(a_N|x) \leq PR(a_P|x)$ and $PR(a_N|x) \leq PR(a_B|x)$, then $x \in NEG(C)$.

In particular, when $(\lambda_{PP} - \lambda_{BP})(\lambda_{PN} - \lambda_{BN}) > (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})(\lambda_{BP} - \lambda_{PP})$, we compute

$$\alpha = \frac{\lambda_{PN} - \lambda_{BN}}{(\lambda_{PN} - \lambda_{BN}) + (\lambda_{BP} - \lambda_{PP})}, \qquad \beta = \frac{\lambda_{BN} - \lambda_{BN}}{(\lambda_{BN} - \lambda_{NN}) + (\lambda_{NP} - \lambda_{BP})}.$$

The 3WD rules can be simplified as:

$(P0)$ $If\ PR(C|x) \geq \alpha$, then then $x \in POS(C)$,

$(B0)$ $If\ , \beta < PR(C|x) < \alpha$,then $x \in BND(C)$,

$(N0)$ $If\ PR(C|x) \leq \beta$ then $x \in NEG(C)$.

When, $(\lambda_{NP} - \lambda_{BP})(\lambda_{PN} - \lambda_{BN}) \leq (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})(\lambda_{BP} - \lambda_{PP})$, it gives

$$\gamma = \frac{\lambda_{PN} - \lambda_{NN}}{(\lambda_{PN} - \lambda_{NN}) + (\lambda_{NP} - \lambda_{PP})}.$$

The 3WD rules are written in the following forms:

$(P1)$ $If\ PR(C|x) \geq \gamma$, then then $x \in POS(C)$,

$(N1)$ $If\ PR(C|x) < \gamma$ then $x \in NEG(C)$.

In the above computations, the condition of $PR(Cx) + PR(\neg C|x) = 1$ has been used.

III. The Ranking of IVFFNs

As illustrated in the 3WD framework, the partial order of expected losses should be determined in fuzzy environments.

Definition 5. Let $F = \{[m_{FL}, m_{FU}], [n_{FL}, n_{FU}]\}$ be an IVFFN. The measure $M_1(F)$ is defined as:

$$M_1(F) = 1 - \sqrt[3]{\frac{(1 - {m^3}_{FL} - {m^3}_{FU})^3 + (n_{FL} - n_{FU})^6 + h^6}{2}}.$$

When $M_1(F_1) \geq M_1(F_2)$, it gives $F_1 \geq F_2$.

It is assumed that $\mathbb{C}$ stands for the set of FFNs and $\mathcal{F}$ is a subset of $\mathbb{C}$. For $F_1, F_2, F_{3,} \in \mathcal{F}$ and the order relation $\geq$ under a ranking method M, the reasonable properties are given below:

MA1. $F \geq F$, for $F \in \mathcal{F}$

MA2. For $F_1, F_2 \in \mathcal{F}, F_1 \geq F_2$ and $F_2 \geq F_1 \Rightarrow F_1 \sim F_2$

MA3. For $F_1, F_2, F_{3,} \in \mathcal{F}$, $F_1 \geq F_2$ and $F_2 \geq F_3 \Rightarrow F_1 \geq F_3$

MA4. For $F_1, F_2, \in \mathcal{F} \cap$ G, where $\mathcal{F}$, G $\subset \mathbb{C}$, $F_1 \geq F_2$ on $\mathcal{F} \Leftrightarrow F_1 \geq F_2$ on G.

MA5. For $F_1, F_2 \in \mathcal{F}$, $inf\{Supp(F_1)\} > sup\{Supp(F_2)\} \Rightarrow F_1 \geq F_2$ or $F_1 > F_2$.

MA6. For $F_1, F_2 \in \mathcal{F}$, $F_1 \oplus F_3, F_2 \oplus F_3 \in \mathcal{F}$, $F_1 \geq F_2 \Rightarrow F_1 \oplus F_3 \geq F_2 \oplus F_3$.

MA7. For $F_1, F_2, F_3 \in \mathcal{F}$, $F_1 \otimes F_3, F_2 \otimes F_3 \in \mathcal{F}$, $F_1 \geq F_2$ and $F_3 > 0 \Rightarrow F_1 \otimes F_3 \geq F_2 \otimes F_3$.

The ranking criterion M lacks several reasonable properties because it ignores some fundamental operations of FFNs; therefore, a generalized FFN ranking method based on t-(co)norms is presented below.

Definition 6. For two IVFFNs $F_1 = \{[m_{FL1}, m_{FU1}], [n_{FL1}, n_{FU1}]\}$, $F_2 = \{[m_{FL2}, m_{FU2}], [n_{FL2}, n_{FU2}]\}$, the distance is defined as

$$DIS(F_1, F_2) = S(|(m^3{}_{F1L} + m^3{}_{F1U}) - (m^3{}_{F2L} + m^3{}_{F2U})|, |(n^3{}_{F1L} + n^3{}_{F1U}) - (n^3{}_{F2L} + n^3{}_{F2U})|),$$

where S is a strict t-conorm. For any $F = \{[m_{FL}, m_{FU}], [n_{FL}, n_{FU,}]\}$ and $F_0 = \{[0,0], [1,1]\}$, a measure is conducted as:

$$M(F) = DIS(F, F_0) = S\big((m_L^3, m_U^3), (1 - n_L^3, 1 - n_U^3)\big).$$

If $M(F_1) \geq M(F_2)$, then $F_1 \geq F_2$. From T(1-x, 1-y)=1-S(x, y), the measure M can be rewritten as: $(F) = 1 - T\big(\ (1 - m_L^3, 1 - m_U^3), (n_L^3, n_U^3)\big)$.

Theorem 1. If the method M is used to rank IVFFNs, the properties MA1-MA4 hold.

Theorem 2. For two IVFFNs $F_1 = \{[m_{FL1}, m_{FU1}], [n_{FL1}, n_{FU1}]\}, F_2 = \{[m_{FL2}, m_{FU2}], [n_{FL2}, n_{FU2}]\}$, if $m_{FL1} \geq m_{FL2}, m_{FU1} \geq m_{FU2}$ and $n_{FL1} \leq n_{FL2}, n_{FU1} \leq n_{FU2}$, we have $F_1 \geq F_2$.

Theorem 3. For $F_1, F_2 \in \mathcal{F}$, $F_1 \oplus F_3$, $F_2 \oplus F_3 \in \mathcal{F}$, we have $F_1 \oplus F_3 \geq F_2 \oplus F_3$, if $F_1 > F_2$.

Theorem 4. For $\kappa > 0$ and $F_1, F_2, \kappa.F_1, \kappa.F_2 \in \mathcal{F}$, we have $\kappa.F_1 \geq \kappa.F_2$ if $F_1 \geq F_2$.

IV. 3WD RULES

We will develop 3WD rules in Fermatean fuzzy environments using the ranking method for FFNs described in Definition 6. Suppose that the 3WD loss functions are expressed as FFNs to quantify uncertainty as:

$$a_P = [C, \neg C] = \big[\bar{\lambda}_{PP} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{PP}}, m_{U\bar{\lambda}_{PP}}], [n_{L\bar{\lambda}_{PP}}, n_{U\bar{\lambda}_{PP}}]\big), \bar{\lambda}_{PN} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{PN}}, m_{U\bar{\lambda}_{PN}}], [n_{L\bar{\lambda}_{PN}}, n_{U\bar{\lambda}_{PN}}]\big)\big]$$
$$a_B = [C, \neg C] = \big[\bar{\lambda}_{BP} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{BP}}, m_{U\bar{\lambda}_{BP}}], [n_{L\bar{\lambda}_{BP}}, n_{U\bar{\lambda}_{BP}}]\big), \bar{\lambda}_{BN} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{BN}}, m_{U\bar{\lambda}_{BN}}], [n_{L\bar{\lambda}_{BN}}, n_{U\bar{\lambda}_{BN}}]\big)\big]$$
$$a_N = [C, \neg C] = \big[\bar{\lambda}_{NP} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{NP}}, m_{U\bar{\lambda}_{NP}}], [n_{L\bar{\lambda}_{NP}}, n_{U\bar{\lambda}_{NP}}]\big), \bar{\lambda}_{NN} = \big([m_{L\bar{\lambda}_{NN}}, m_{U\bar{\lambda}_{NN}}], [n_{L\bar{\lambda}_{NN}}, n_{U\bar{\lambda}_{NN}}]\big)\big]$$

By considering the risks of making decisions, the following relations should be satisfied:

$$\begin{cases} m_{L\bar{\lambda}_{PP}} \leq m_{L\bar{\lambda}_{BP}} < m_{L\bar{\lambda}_{NP}}; \ m_{U\bar{\lambda}_{PP}} \leq m_{U\bar{\lambda}_{BP}} < m_{U\bar{\lambda}_{NP}} \\ m_{L\bar{\lambda}_{NP}} \leq m_{L\bar{\lambda}_{BP}} < m_{L\bar{\lambda}_{PP}}; \ m_{U\bar{\lambda}_{NP}} \leq m_{U\bar{\lambda}_{BP}} < m_{U\bar{\lambda}_{PP}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_{L\bar{\lambda}_{NN}} \leq m_{L\bar{\lambda}_{BN}} < m_{L\bar{\lambda}_{PN}}; \ m_{U\bar{\lambda}_{NN}} \leq m_{U\bar{\lambda}_{BN}} < m_{U\bar{\lambda}_{PN}} \\ m_{L\bar{\lambda}_{PN}} \leq m_{L\bar{\lambda}_{BN}} < m_{L\bar{\lambda}_{NN}}; \ m_{U\bar{\lambda}_{PN}} \leq m_{U\bar{\lambda}_{BN}} < m_{U\bar{\lambda}_{NN}} \end{cases}$$

From these conditions and Theorem 2, the following relations should be satisfied: $\bar{\lambda}_{PP} \leq \bar{\lambda}_{BP} < \bar{\lambda}_{NP}$, $\bar{\lambda}_{NN} \leq \bar{\lambda}_{BN} < \bar{\lambda}_{PN}$.

In $\bar{\lambda}_{PP} \leq \bar{\lambda}_{BP} < \bar{\lambda}_{NP}$, when object $x \in C$, the positive loss of accepting x is less than or equal to that of delaying x. The positive losses of accepting and delaying x are less than those of rejecting x. The relations between negative losses are the opposite of those between positive losses. Inequalities $\bar{\lambda}_{NN} \leq \bar{\lambda}_{BN} < \bar{\lambda}_{PN}$ can be similarly explained by considering the case where object $x \in \neg C$.

A. *The expected Losses*

Under Fermatean fuzzy environments, the expected losses in 3WD can be computed as follows:

$$R(a_P|x) = PR(C|x)\bar{\lambda}_{PP} \oplus PR(\neg C|x)\bar{\lambda}_{PN},$$
$$R(a_B|x) = PR(C|x)\bar{\lambda}_{BP} \oplus PR(\neg C|x)\bar{\lambda}_{BN},$$
$$R(a_N|x) = PR(C|x)\bar{\lambda}_{NP} \oplus PR(\neg C|x)\bar{\lambda}_{NN}.$$

Based on the operations of IVFFNs in Definition 4, the following operations can be given:

$$R(a_P|x) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(PR(C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{PP}} + PR(C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{PP}} + PR(\neg C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}} + PR(\neg C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{PN}}\right)}, \\ \sqrt[3]{\tau^{-1}\left(PR(C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{PP}} + PR(C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{PP}} + PR(\neg C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{PN}} + PR(\neg C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{PN}}\right)} \end{array} \right\},$$

$$R(a_B|x) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(PR(C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}} + PR(C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{BN}} + PR(\neg C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}} + PR(\neg C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{BN}}\right)}, \\ \sqrt[3]{\tau^{-1}\left(PR(C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{BP}} + PR(C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{BN}} + PR(\neg C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{BP}} + PR(\neg C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{BN}}\right)} \end{array} \right\},$$

$$R(a_N|x)=\left\{\begin{array}{l}\sqrt[3]{\zeta^{-1}\left(PR(C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+PR(C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{NN}}+PR(\neg C|x)\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+PR(\neg C|x)\zeta m^3_{U\bar{\lambda}_{NN}}\right)},\\ \sqrt[3]{\tau^{-1}\left(PR(C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+PR(C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{NN}}+PR(\neg C|x)\tau n^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+PR(\neg C|x)\tau n^3_{U\bar{\lambda}_{NN}}\right)}\end{array}\right\}.$$

Theorem 5. Suppose that $PR(C|x)$ is a constant. For $R(a_i|x)=\{X_i,Y_i\}$,

(I) X_i is non-monotonically decreasing w.r.t. $\left[m_{L\bar{\lambda}_{iP}},m_{U\bar{\lambda}_{iP,}}\right]$ and $\left[m_{L\bar{\lambda}_{iN}},m_{U\bar{\lambda}_{iN}}\right]$.

(II) Y_i is non-monotonically decreasing w.r.t. $\left[n_{L\bar{\lambda}_{iP}},n_{U\bar{\lambda}_{iP}}\right]$ and $\left[n_{L\bar{\lambda}_{iN}},n_{U\bar{\lambda}_{iN}}\right]$.

B. Ranking-based 3WD Rules

By considering typical 3WD rules of (P), (B), and (N), the 3WD rules under IVFF environments are formed below:

$(P2)\ If\ R(a_P|x)\le R(a_B|x)\ \ and\ R(a_P|x)\le R(a_N|x), then\ x\in POS(C),$

$(B2)\ If\ R(a_B|x)\le R(a_P|x)\ \ and\ R(a_B|x)\le R(a_N|x), then\ x\in BND(C),$

$(N2)\ If\ R(a_N|x)\le R(a_P|x)\ \ and\ R(a_N|x)\le R(a_B|x), then\ x\in NEG(C).$

Based on the ranking method of IVFFNs, the 3WD rules (P2), (B2), and (N2) are represented as:

$(P3)\ If\ M\big(R(a_P|x)\big)\le M\big(R(a_B|x)\big)\ \ and\ M\big(R(a_P|x)\big)\le M\big(R(a_N|x)\big), then\ x\in POS(C),$

$(B3)\ If\ M\big(R(a_B|x)\big)\le M\big(R(a_P|x)\big)\ \ and\ M\big(R(a_B|x)\big)\le M\big(R(a_N|x)\big), then\ x\in BND(C),$

$(N3)\ If\ M\big(R(a_N|x)\big)\le M\big(R(a_P|x)\big)\ \ and\ M\big(R(a_N|x)\big)\le M\big(R(a_B|x)\big), then\ x\in NEG(C).$

For $R(a_i|x)=(X_i,Y_i)$, the value $M\big(R(a_i|x)\big)$ has been calculated, and the corresponding α,β, and γ values have been found as follows:

For

$$A=\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{PN}}\right)-\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)\right]+\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)-\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)\right]$$

$$B=\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{PN}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)\right]+\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)\right]$$

$$\alpha=\frac{\left[\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)\right]+\left[\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)\right]}{A+B}.$$

For

$$C=\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\zeta m^3_{LNN}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{NP}}\right)-\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{BP}}\right)\right]$$

$$D=\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{NP}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{BP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{bP}}\right)\right]$$

$$\beta=\frac{\left[\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]}{C+D}.$$

For

$$E=\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{PN}}\right)-\left(\zeta m^3_{LNN}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{NP}}\right)-\left(\zeta m^3_{L\bar{\lambda}_{PP}}+\zeta m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)\right]$$

$$F=\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{PN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{PN}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{NP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{NP}}\right)-\left(\tau m^3_{L\bar{\lambda}_{PP}}+\tau m^3_{u\bar{\lambda}_{PP}}\right)\right]$$

$$\gamma=\frac{\left[\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\zeta.m^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\zeta.m^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]+\left[\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{BN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{BN}}\right)-\left(\tau.n^3_{L\bar{\lambda}_{NN}}+\tau.n^3_{u\bar{\lambda}_{NN}}\right)\right]}{E+F}.$$

The 3WD rules (P3), (B3), and (N3) can be written as

$(P4)\ If\ PR(C|x)\ge\alpha\ \ and\ PR(C|x)\ge\gamma,\ \ then\ x\in POS(C),$

$(B4)\ If\ PR(C|x)\le\alpha\ \ and\ PR(C|x)\ge\beta,\ \ then\ x\in BND(C),$

$(N4)\ If\ PR(C|x)\le\beta\ \ and\ PR(C|x)\le\gamma,\ \ then\ x\in NEG(C),$

V. 3WD ALGORİTHM

Step 1: The expert evaluates alternative x_i in terms of attribute a_j, deriving a normalized attribute value expressed as IVFFN $F_{ij} = \{[m_{FLij}, m_{FUij}], [n_{FLij}, n_{FUij}]\}$.

Step 2: Given that the alternatives show little difference on an attribute, that attribute's weight should be correspondingly reduced. The weight of attribute j is computed as:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} DIS(F_{ij}, F_{kj})}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} DIS(F_{ij}, F_{kj})},$$

Step 3: The conditional probability $PR(C|x)$ is computed by using the TOPSIS method. First, let us denote the positive and negative ideal solutions by $x+$ and $x-$, respectively, using the proposed measure MF. Defining

$$\{[m^+{}_j, m^+{}_j], [n^+{}_j, n^+{}_j]\} = F_{kj}, \quad M(F_{kj}) = \max_{1\le i\le m} M(F_{ij}),$$
$$\{[m^-{}_j, m^-{}_j], [n^-{}_j, n^-{}_j]\} = F_{kj}, \quad M(F_{kj}) = \max_{1\le i\le m} M(F_{ij}),$$

We have

$$x^+ = (\{[m^+{}_1, m^+{}_1], [n^+{}_1, n^+{}_1]\}, \{[m^+{}_2, m^+{}_2], [n^+{}_2, n^+{}_2]\}, \dots, \{[m^+{}_n, m^+{}_n], [n^+{}_n, n^+{}_n]\}),$$
$$x^- = (\{[m^-{}_1, m^-{}_1], [n^-{}_1, n^-{}_1]\}, \{[m^-{}_2, m^-{}_2], [n^-{}_2, n^-{}_2]\}, \dots, \{[m^-{}_n, m^-{}_n], [n^-{}_n, n^-{}_n]\}).$$

Second, the weighted distance between x_i and $x+$ ($x-$) is obtained as:

$$D(x_i, \mathrm{x}^+) = \sum_{j=1}^{n} w_j\, S\left(\left|\left(m^{+3}{}_{FLij} + m^{+3}{}_{FUj}\right) - \left(m^{+3}{}_{FLij} + m^{+3}{}_{FUj}\right)\right|, \left|\left(n^{+3}{}_{FLij} + n^{+3}{}_{FUj}\right) - \left(n^{43}{}_{FLij} + n^{43}{}_{FUj}\right)\right|\right),$$

$$D(x_i, \mathrm{x}^-) = \sum_{j=1}^{n} w_j\, S\left(\left|\left(m^{-3}{}_{FLij} + m^{-3}{}_{FUj}\right) - \left(m^{-3}{}_{FLij} + m^{-3}{}_{FUj}\right)\right|, \left|\left(n^{-3}{}_{FLij} + n^{-3}{}_{FUj}\right) - \left(n^{-3}{}_{FLij} + n^{-3}{}_{FUj}\right)\right|\right),$$

Third, the relative closeness can approximate the conditional probability of belonging to set C, we estimate this conditional probability as follows:

$$PR(C|x_i) = \frac{D(x_i, \mathrm{x}^-)}{D(x_i, \mathrm{x}^-) + D(x_i, \mathrm{x}^+)}$$

Step 4: In classical 3WD rules, the loss function is usually fixed for a given decision action and state set. Although multi-attribute extensions propose varying loss functions based on attribute values, this study adopts a fixed-loss framework to focus on developing 3WD models based on t-(co)norms.

Step 5: Use the developed 3WD rules to obtain POS(C), NEG(C), BND(C), and the ranking of alternatives according to $PR(C|x_i)$.

VI. DİSCUSSİON AND CONCLUSİON

In everyday life, it is common to decide whether to accept, delay, or reject an alternative in a decision-making problem. A three-way decision (3WD) attempts to find the rule for classifying alternatives into the regions of positive, boundary, and negative. In this paper, we have proposed novel 3WD rules under interval-valued Fermatean fuzzy environments based on strict t-(co)norms. Some conclusions are summarized as follows:

To address the limitations of existing ranking methods for interval-valued Fermatean fuzzy numbers, we propose a novel distance-based method grounded in strict t-(co)norms. The key innovation of our approach lies in its rigorous axiomatic foundation, which ensures the fulfillment of essential theoretical properties.

The expected losses in 3WD rules under interval-valued Fermatean fuzzy environments are computed generally by using strict t-(co)norms. The 3WD rules are constructed using the ranking method for interval-valued Fermatean fuzzy numbers. The novel finding is that strict t-(co)norms can improve the performance of 3WD rules as compared to conventional ones by enabling a more reasonable classification of alternatives.

REFERENCES

[1] C. Chen, F. Liu, P. Wu, W. Pedrycz, and X.Y. Wei "*A strict t-(co) norms-based three-way decision model under Pythagorean fuzzy environments*". *Expert Systems with Applications*, 319, 132104, 2026.

[2] J. Deng, J. Zhan, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera "Regret theory-based three-way decision method on incomplete multi-scale decision information systems with interval fuzzy numbers". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(3), 982–996, 2023.

[3] J. Deng, J. Zhan, W. Ding, P. Liu, and W. Pedrycz "A novel prospect-theory-based three-way decision methodology in multi-scale information systems". *Artificial Intelligence Review*, 56(7), 6591–6625, 2023.

[4] X. Huang, J. Zhan, Z. Xu, and H. Fujita "A prospect-regret theory-based three-way decision model with intuitionistic fuzzy numbers under incomplete multi-scale decision information systems". *Expert Systems with Applications*, 144, 214119, 2023.

[5] M. Kirişci "*Fermatean fuzzy type a three-way correlation coefficient*". In the *International Conference on Mathematics and its Applications in Science and Engineering*. Cham: Springer Nature Switzerland, vol. 439, pp. 325-338, July 2023.

[6] P. Mandal, S. Samanta, M. Pal, and A.S. Ranadive "Regret theory based three-way conflict analysis model under q-rung orthopair fuzzy information: studies with parameter and three-way decision-making-based approaches". *Artificial Intelligence Review*, *56,* S3417–S3469, *2023*.

[7] H. Zhang, Y. Liu, D. Selang, and Y. He "A three-way decision with prospect-regret theory under Pythagorean fuzzy environments". *Applied Soft Computing*, *167*, 112286, 2024.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Sentinel-2 Görüntüleri Kullanılarak Akdeniz Yangın Ortamlarında ΔNBR Eşik Değerlerine Göre Yanmış Alan Tahmini Duyarlılığının İncelenmes

Noliwe Patricia Ngudle, Gökhan Çınar*

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** 505720230024@ogrenci.ogu.edu.tr

ÖZET

Orman yangınları, özellikle büyük yangın olaylarının sıklıkla yaşandığı Yunanistan ve Türkiye başta olmak üzere Akdeniz bölgelerinde önemli bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Bu çalışma, Sentinel-2 uydu görüntüleri ve Diferansiyel Normalize Yanıklık Oranı (ΔNBR) kullanılarak beş Akdeniz yangını vaka çalışmasında yanmış alan ve yangın şiddeti haritalamasının ΔNBR eşik değeri seçimine duyarlılığını incelemektedir: Attika (2021), Marmaris (2021), Midilli/Lesvos (2022), Rodos (2023) ve Çanakkale (2023). Üç farklı ΔNBR eşik değeri (0,27, 0,44 ve 0,66) uygulanmış ve Sentinel-2 Sahne Sınıflandırma Katmanı (SCL Sınıf 4) kullanılarak bitki örtüsü maskelemesi gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen yanmış alanlar, resmi istatistikler, Copernicus EMS raporları, FIRE-RES tahminleri ve yayımlanmış çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Attika (2021) için ΔNBR > 0,44 eşiği 23.319 ha tahmini üretmiş ve yayımlanan 24.275,8 ha değerine %3,9 fark ile en yakın sonucu vermiştir. Benzer şekilde, Çanakkale (2023) için aynı eşik değeri 4.685,57 ha tahmini üretmiş ve yaklaşık 4.445 ha olan referans değere %5,4 fark ile en yakın sonucu sağlamıştır. Ayrıca bitki örtüsü maskelemesi, su yüzeyleri, çıplak toprak ve kentsel alanlardan kaynaklanan yanlış sınıflandırmaları azaltmıştır. Bulgular, Akdeniz yangın ortamlarında tüm bölgeler için geçerli tek bir ΔNBR eşik değerinin bulunmadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *ΔNBR, Sentinel-2, Yanmış alan haritalama, Yangın şiddeti, Akdeniz orman yangınları.*

Sensitivity of Burned Area Estimation to ΔNBR Threshold Selection Across Mediterranean Wildfire Environments Using Sentinel-2 Imagery

ABSTRACT

Wildfires are a recurring environmental challenge in Mediterranean regions, with Greece and Türkiye experiencing large-scale events that cause severe ecological and economic damage. Accurate burned area estimation is essential for environmental monitoring, post-fire assessment, and forest management. This study investigates the sensitivity of burned area estimation to different differenced Normalized Burn Ratio (ΔNBR) thresholds using Sentinel-2 imagery across five wildfire case studies: Attica (2021), Marmaris (2021), Lesvos (2022), Rhodes (2023), and Çanakkale (2023). Burned areas were extracted using three ΔNBR thresholds (0.27, 0.44, and 0.66), while vegetation masking was applied using the Sentinel-2 Scene Classification Layer to reduce the influence of non-vegetated surfaces. Burned area estimates were compared with official wildfire statistics, Copernicus EMS reports, FIRE-RES estimates, and published studies. For Attica (2021), the ΔNBR > 0.44 threshold produced 23,319 ha, within 3.9% of the published value of 24,275.8 ha. Similarly, for Çanakkale (2023), the ΔNBR > 0.44 threshold produced 4,685.57 ha, within 5.4% of the published estimate of approximately 4,445 ha. Vegetation masking slightly reduced burned area estimates across all study sites by excluding water bodies, urban surfaces, and bare soil from classification results. Across all study sites, thresholds lower than 0.44 generally overestimated burned extent, while higher thresholds underestimated total affected area. The findings demonstrate that no single ΔNBR threshold universally performs best across Mediterranean wildfire environments.

Keywords: *Burned area mapping, Burn severity, ΔNBR, Mediterranean wildfires, Sentinel-2.*

I. INTRODUCTİON

Wildfires are becoming increasingly frequent and severe in Mediterranean regions due to climate change, prolonged drought conditions, rising temperatures, and extreme weather events [3]. Countries such as Greece and Türkiye have experienced several catastrophic wildfire events in recent years, resulting in extensive environmental degradation, biodiversity loss, ecosystem damage, and significant economic impacts. The 2021–2023 wildfire seasons were among the most destructive recorded in the Mediterranean region, with large-scale fires affecting forest ecosystems, agricultural land, and protected natural areas across southern Europe.

Accurate burned area estimation is essential for wildfire management, post-fire assessment, ecological recovery monitoring, and environmental planning. Remote sensing techniques provide efficient and cost-effective approaches for mapping burned areas across large geographic regions. Among various spectral indices, the Normalized Burn Ratio (NBR) and differenced Normalized Burn Ratio (ΔNBR) are widely used for burned area detection and burn severity assessment due to their sensitivity to vegetation loss and fire-induced spectral changes [6], [7].

The ΔNBR index is calculated by subtracting post-fire NBR values from pre-fire NBR values derived from satellite imagery and has become one of the most commonly applied methods for wildfire assessment. Sentinel-2 imagery offers important advantages for burned area mapping due to its 10 m spatial resolution, multispectral capabilities, and high temporal revisit frequency [8]. Previous studies have demonstrated that Sentinel-2-based ΔNBR analysis can produce reliable burned area estimates; however, results remain highly sensitive to threshold selection and local environmental conditions [2]. Commonly applied thresholds such as 0.27, 0.44, and 0.66 are frequently used to represent moderate, high, and very high burn severity levels, respectively, but their performance varies depending on vegetation structure, wildfire intensity, terrain characteristics, and image acquisition timing [7]. Furthermore, the inclusion of non-vegetated surfaces in burned area calculations — such as urban areas, bare soil, and water bodies — can lead to overestimation if land cover masking is not applied.

Although ΔNBR thresholding is widely used in wildfire studies, no single threshold value has been universally validated across different Mediterranean wildfire environments. Threshold values that perform well in one region may overestimate or underestimate burned extent in another due to differences in vegetation density, climatic conditions, topography, and fire behavior. Evaluating threshold sensitivity across multiple Mediterranean case studies is therefore essential for improving burned area estimation accuracy and understanding the limitations of applying universal threshold values.

This study investigates the sensitivity of burned area estimation to ΔNBR threshold selection using Sentinel-2 imagery across five Mediterranean wildfire case studies: Attica (2021); Marmaris (2021); Lesvos (2022); Rhodes (2023); and Çanakkale (2023). These events were selected to represent diverse Mediterranean wildfire environments with varying fire sizes, vegetation characteristics, and geographic conditions, and all had access to official or validated burned area estimates for comparison [1], [4], [5].

The objectives of this study are:

1. To map burned areas and assess burn severity using Sentinel-2 ΔNBR imagery.
2. To evaluate the sensitivity of burned area estimation to different ΔNBR threshold values (0.27, 0.44, and 0.66).
3. To assess the effect of vegetation masking using the Sentinel-2 Scene Classification Layer (SCL) on burned area estimates.
4. To compare ΔNBR-based burned area estimates with official wildfire statistics and validated burned area datasets.
5. To determine whether ΔNBR threshold performance varies systematically across Mediterranean wildfire regions.

II. MATERİALS AND METHODS

A. Study Areas

Five Mediterranean wildfire events were selected as case studies, representing diverse environmental conditions, vegetation structures, fire sizes, and geographic characteristics across the 2021–2023 fire seasons. All selected case studies had access to official burned area statistics, Copernicus EMS reports, FIRE-RES estimates, or published burned area assessments for validation purposes.

Attica, Greece (2021): Four major wildfire events occurred in August 2021 across Attica Prefecture, a mountainous region covering approximately 380,000 ha north of Athens. Vegetation is dominated by *Pinus halepensis* forests and Mediterranean shrublands [9].

Marmaris, Türkiye (2021): The Marmaris district of Muğla Province experienced severe wildfires in July–August 2021, affecting dense coniferous and mixed forests on steep coastal terrain along the Aegean coast [12].

Lesvos, Greece (2022): A major wildfire broke out on 23 July 2022 near the Vatera coastal resort in southern Lesvos Island, burning pine forests and cultivated fields over six days [5].

Rhodes, Greece (2023): Large-scale wildfires affected the interior and southern areas of Rhodes Island in July–August 2023, prompting mass evacuations and burning diverse Mediterranean vegetation [1].

Çanakkale, Türkiye (2023): A significant forest fire occurred in the Çanakkale region of northwestern Türkiye in July 2023, affecting dense coniferous forest [11].

Table 1. Study area characteristics and wildfire events.

Study Area	Country	Year	Main Vegetation Type	Reference Burned Area Source
Attica	Greece	2021	Pinus halepensis forest and shrubland	Hellenic Fire Service / Arianoutsou et al.
Marmaris	Türkiye	2021	Coniferous and mixed forest	OGM Reports
Lesvos	Greece	2022	Pine forest and agricultural land	FIRE-RES
Rhodes	Greece	2023	Mediterranean mixed vegetation	Copernicus EMS
Çanakkale	Türkiye	2023	Dense coniferous forest	Ministry / Published Study

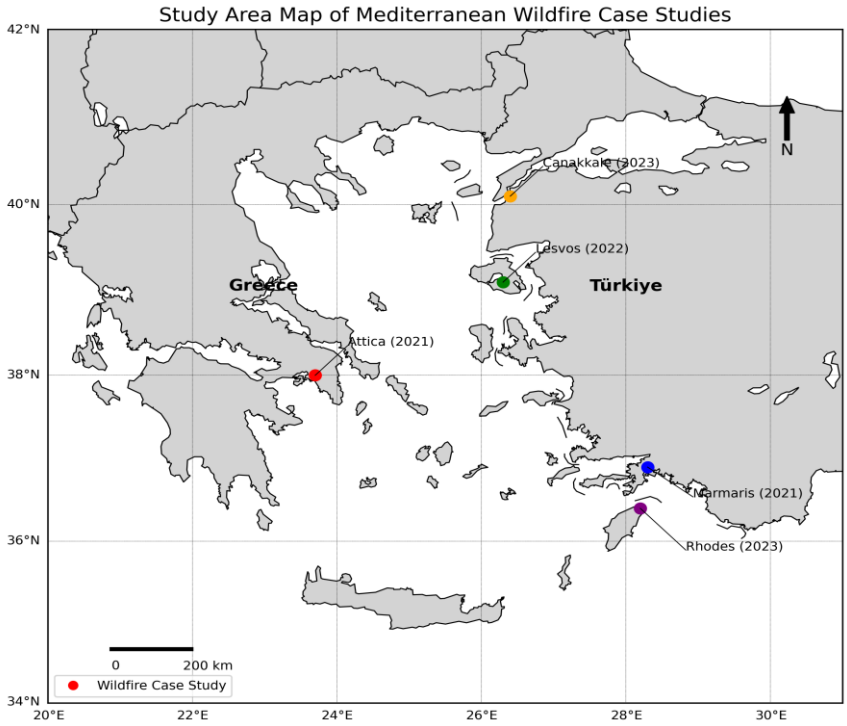


Figure 1. Study area map showing the five Mediterranean wildfire case study locations: Attica, Greece (2021); Marmaris, Türkiye (2021); Lesvos, Greece (2022); Rhodes, Greece (2023); and Çanakkale, Türkiye (2023). Source: Author's own elaboration

B. Sentinel-2 Data Acquisition

Sentinel-2 Level-2A (L2A) satellite imagery was acquired from the Copernicus Open Access Hub for both pre-fire and post-fire periods for each wildfire event. Sentinel-2 was selected due to its high spatial resolution (10 m), multispectral capabilities, and frequent revisit cycle, which are well-suited for burned area mapping and burn severity assessment [8].

Pre-fire and post-fire images were selected based on minimal cloud coverage, temporal proximity to wildfire events, and complete spatial coverage of the affected study areas. The Near-Infrared (NIR) Band 8 (10 m resolution) and Shortwave Infrared (SWIR) Band 12 (20 m resolution) were used for NBR and ΔNBR

calculations. Band 12 was resampled to 10 m spatial resolution within ESA SNAP to ensure consistent pixel dimensions across all computations.

C. Image Preprocessing and NBR Calculation

Image preprocessing and spectral index calculation were performed using ESA SNAP (Sentinel Application Platform) software. Preprocessing steps included spatial subset extraction, cloud inspection, raster band alignment, and resampling. NBR and ΔNBR values were computed using the SNAP Band Maths operator.

The Normalized Burn Ratio (NBR) was calculated as:

$$\text{NBR} = \frac{\text{B8} - \text{B12}}{\text{B8} + \text{B12} + \varepsilon} \quad (1)$$

where B8 is the NIR band, B12 is the SWIR band, and ε = 0.00001 is a small constant added to prevent division by near-zero denominator values.

The differenced Normalized Burn Ratio (ΔNBR) was then computed by subtracting post-fire NBR from pre-fire NBR:

$$\Delta\text{NBR} = \text{NBRpre} - \text{NBRpost} \quad (2)$$

Higher ΔNBR values indicate greater vegetation loss and increased burn severity.

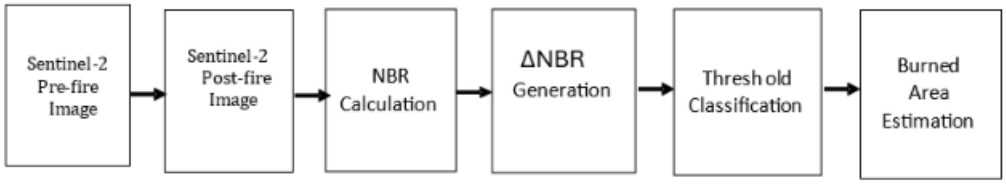


Figure 2. Workflow of Sentinel-2 burned area estimation using NBR, ΔNBR generation, threshold classification, and burned area calculation.

D. Vegetation Masking

To reduce the influence of non-vegetated surfaces on burned area estimation, vegetation masking was applied using the Sentinel-2 Scene Classification Layer (SCL) from the pre-fire image. Only pixels classified as vegetation (SCL Class 4) were retained for burned area analysis, excluding water bodies, urban surfaces, bare soil, and cloud- or shadow-affected pixels. This approach limits burned area estimation to pixels where pre-fire vegetation was confirmed present, reducing potential overestimation caused by spectral changes in non-vegetated surfaces that may resemble fire-affected signals [10].

E. Threshold-Based Burn Severity Classification

Burned area classification was performed using three ΔNBR threshold values following the burn severity classification framework of Key & Benson (2006) and Miller & Thode (2007) [6], [7]:

- ΔNBR > 0.27: Moderate to high burn severity; captures broader burned vegetation extent.
- ΔNBR > 0.44: Moderate-high to high burn severity.
- ΔNBR > 0.66: High-severity burn core regions only.

Binary classification masks were generated for each threshold, where burned pixels were assigned a value of 1 and unburned pixels a value of 0. Classification was applied both with and without the SCL vegetation mask to evaluate the independent effect of vegetation masking on burned area estimates.

Table 2. Example comparison of ΔNBR threshold classifications showing broader burned extent at lower thresholds and core high-severity regions at higher thresholds.

ΔNBR Threshold	**Burn Severity Interpretation**
> 0.27	Moderate to high burn severity; broader burned vegetation extent
> 0.44	Moderate-high to high burn severity
> 0.66	High burn severity core regions

F. Burned Area Estimation

Burned area estimates were derived from binary threshold masks using raster statistical outputs from ESA SNAP. Burned area in hectares was calculated as:

$$\text{Burned Area (ha)} = \text{Mean} \times \text{Total Pixels} \times 0.01$$

where *Mean* represents the proportion of burned pixels within the study area extent (average value of the binary burn mask), *Total Pixels* represents the total number of valid pixels within the study area, and 0.01 represents the area in hectares corresponding to a single Sentinel-2 pixel at 10 m spatial resolution ($100\ m^2 = 0.01$ ha).

This methodology was applied consistently across all five wildfire case studies and all threshold classifications.

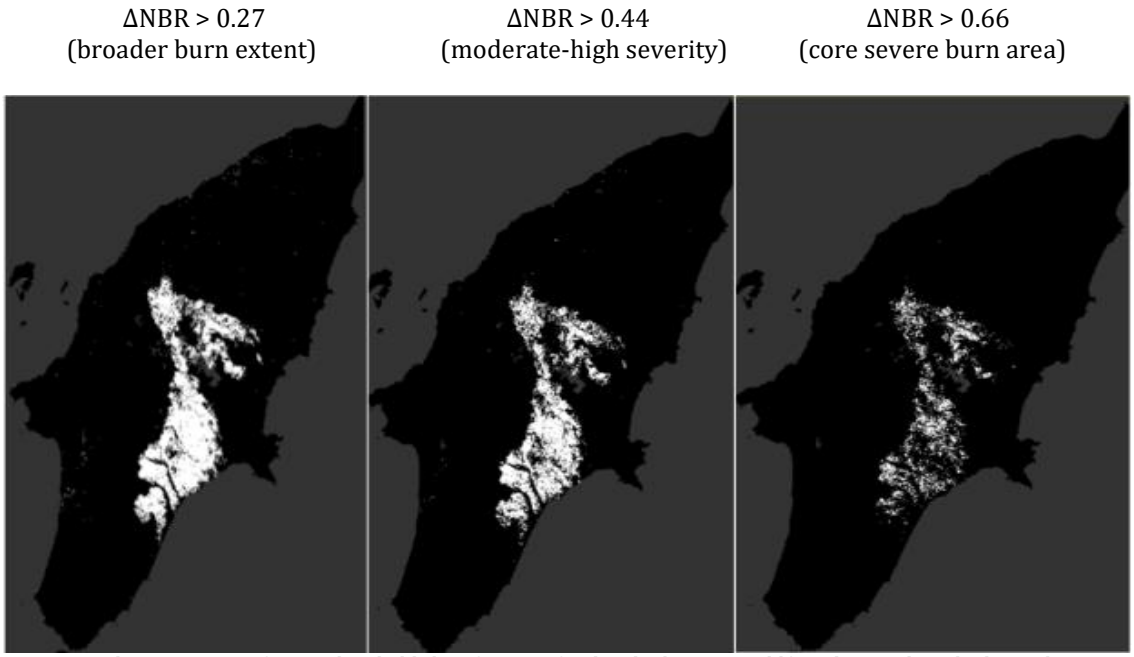


Figure 3. Example comparison of ΔNBR threshold classifications for the Rhodes 2023 wildfire, showing broader burned extent at lower thresholds and concentration of high-severity burn regions at higher thresholds. Source: Author's own elaboration from Sentinel-2 ΔNBR classification results.

G. Validation and Comparison

ΔNBR-based burned area estimates were validated using official wildfire statistics, Copernicus EMS reports, FIRE-RES estimates, and published burned area assessments for each study area. Reference datasets included Arianoutsou et al. (2024) and the Hellenic Fire Service for Attica (2021), OGM reports for Marmaris (2021), FIRE-RES estimates for Lesvos (2022), Copernicus EMS reports for Rhodes (2023), and official reports and published Sentinel-2 analyses for Çanakkale (2023).

Comparison between ΔNBR-derived burned area estimates and independently validated reference datasets enabled evaluation of threshold sensitivity across the five Mediterranean wildfire environments and identification of the threshold values producing the closest agreement with official burned area estimates.

III. RESULTS

A. Burned Area Estimation Results

Burned area estimates derived from the three ΔNBR thresholds showed substantial variation across the five Mediterranean wildfire case studies. Lower threshold values generally produced larger burned area estimates, while higher threshold values reduced the estimated burned extent.

The ΔNBR > 0.44 threshold produced the closest agreement with reference burned area estimates in several study areas, including Attica, Lesvos, and Çanakkale. In Attica (2021), the ΔNBR > 0.44 threshold produced an estimated burned area of 23,319 ha, compared with the published value of 24,275.8 ha. Similarly, in Lesvos (2022), the same threshold produced an estimate of 2,214.64 ha, closely matching the FIRE-RES estimate of 2,163 ha.

In contrast, the ΔNBR > 0.27 threshold generally produced larger burned area estimates across all wildfire regions. For example, in Lesvos (2022), the 0.27 threshold estimated 7,808.66 ha, substantially exceeding the validated burned area estimate. Similarly, in Çanakkale (2023), the 0.27 threshold produced 8,641.83 ha, compared with reference estimates ranging between approximately 4,080 and 4,445 ha.

The ΔNBR > 0.66 threshold consistently produced the most conservative burned area estimates across all wildfire events, primarily capturing high-severity burn core regions.

Table 3. Comparison of ΔNBR burned area estimates with reference wildfire statistics.

Region	Year	ΔNBR Threshold	Estimated Burned Area (ha)	Reference /Official Estimate	Interpretation
Attica	2021	>0.27	38,783 ha	24,275.8 ha	Strong overestimation
		>0.44	23,319 ha	24,275.8 ha	Closest estimate
		>0.66	13,247 ha	24,275.8 ha	Underestimation
Marmaris	2021	>0.27	9,418 ha	~15,000 ha	Closest estimate
		>0.44	6,599 ha	~15,000 ha	Underestimation
		>0.66	3,860 ha	~15,000 ha	Strong underestimation
Lesvos	2022	>0.27	7,808.66 ha	2,163 ha	Strong overestimation
		>0.44	2,214.64 ha	2,163 ha	Closest estimate
		>0.66	508.55 ha	2,163 ha	Underestimation
Rhodes	2023	>0.27	14,618 ha	17,628 ha	Closest estimate
		>0.44	11,063 ha	17,628 ha	Underestimation
		>0.66	4,556 ha	17,628 ha	Strong underestimation
Çanakkale	2023	>0.27	8,641.83 ha	~4,080–4,445 ha	Strong overestimation
		>0.44	4,685.57 ha	~4,080–4,445 ha	Closest estimate
		>0.66	1,925.20 ha	~4,080–4,445 ha	Underestimation

Table 4. Vegetation-masked ΔNBR burned area estimates across the five wildfire case studies.

Region	ΔNBR Threshold	Mean	Total Pixels	Estimated Burned Area (ha)
Attica	>0.27 + Vegetation Mask	0.1166	32,075,109	37,400 ha
	>0.44 + Vegetation Mask	0.0717	32,075,109	22,998 ha
	>0.66 + Vegetation Mask	0.0412	32,075,109	13,215 ha
Marmaris	>0.27 + Vegetation Mask	0.1446	6,155,660	8,901 ha
	>0.44 + Vegetation Mask	0.1036	6,155,660	6,377 ha
	>0.66 + Vegetation Mask	0.0623	6,155,660	3,835 ha
Lesvos	>0.27 + Vegetation Mask	0.0385	16,404,750	6,315.83 ha
	>0.44 + Vegetation Mask	0.0098	16,404,750	1,607.67 ha
	>0.66 + Vegetation Mask	0.0022	16,404,750	360.90 ha
Rhodes	>0.27 + Vegetation Mask	0.0753	11,551,941	8,699.61 ha
	>0.44 + Vegetation Mask	0.0607	11,551,941	7,010.03 ha
	>0.66 + Vegetation Mask	0.0377	11,551,941	4,354.08 ha
Çanakkale	>0.27 + Vegetation Mask	0.2102	3,920,977	8,240.29 ha
	>0.44 + Vegetation Mask	0.1168	3,920,977	4,579.70 ha
	>0.66 + Vegetation Mask	0.0491	3,920,977	1,925.20 ha

B. Threshold Sensitivity Comparison

Comparison of threshold performance across the five study areas demonstrated substantial sensitivity of burned area estimation to ΔNBR threshold selection.

Table 5. Percentage difference between ΔNBR estimates and reference burned area values.

Region	Best Threshold	Percentage Difference
Attica	>0.44	3.9%
Lesvos	>0.44	2.4%
Çanakkale	>0.44	5.4%
Rhodes	>0.27	17.1%
Marmaris	>0.27	~37.2%

The ΔNBR > 0.44 threshold produced the lowest percentage differences in Attica, Lesvos, and Çanakkale, while the ΔNBR > 0.27 threshold produced the closest estimate for Rhodes and Marmaris.

Official Marmaris statistics represent combined wildfire impacts from the 2021–2022 fire seasons, while the ΔNBR estimates in this study represent the 2021 wildfire event only

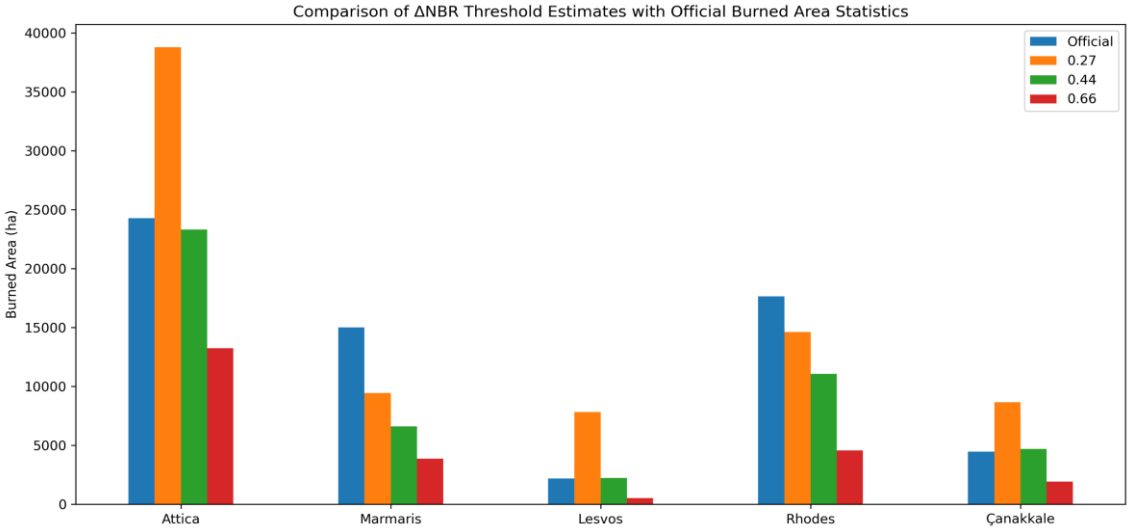


Figure 4. Comparison of ΔNBR threshold-based burned area estimates with official and validated wildfire statistics across the five Mediterranean wildfire case studies.

The results indicate that ΔNBR threshold performance varied across Mediterranean wildfire regions, with no single threshold producing the closest agreement for all wildfire events.

IV. DİSCUSSİON

The results of this study demonstrate that burned area estimation using Sentinel-2 ΔNBR imagery is highly sensitive to threshold selection and varies substantially across Mediterranean wildfire environments. Although ΔNBR thresholding is widely used for wildfire assessment, the findings confirm that no single threshold value consistently produces the most accurate burned area estimates across different geographic regions, vegetation structures, and fire conditions.

Among the evaluated thresholds, ΔNBR > 0.44 generally produced the closest agreement with validated burned area estimates in several study areas, including Attica, Lesvos, and Çanakkale. These findings are consistent with previous wildfire studies that identified moderate-high ΔNBR thresholds as effective for burned area delineation in Mediterranean forest ecosystems [6], [7]. The ΔNBR > 0.44 threshold appears to provide a balance between excluding low-severity spectral noise and retaining substantial burned vegetation extent.

In contrast, the ΔNBR > 0.27 threshold frequently produced strong overestimation of burned area, particularly in Lesvos and Çanakkale. Lower thresholds capture broader spectral changes and may include partially affected vegetation, bare soil, agricultural land, shadow effects, and other non-fire-related surface changes. Similar overestimation effects associated with low ΔNBR thresholds have been reported in previous studies using Landsat and Sentinel-2 imagery [2], [7].

The ΔNBR > 0.66 threshold consistently produced the smallest burned area estimates across all wildfire events. This threshold primarily identified high-severity burn core regions while excluding moderate and low-severity burned vegetation. Although this approach reduced overestimation, it also resulted in substantial underestimation of total burned extent. These findings suggest that very high ΔNBR thresholds may be more suitable for identifying severe ecological damage zones rather than total wildfire extent.

The variability observed between wildfire regions highlights the importance of environmental and geographic factors in ΔNBR-based burned area estimation. Differences in vegetation density, forest type, terrain characteristics, moisture conditions, agricultural land cover, and wildfire intensity likely contributed to threshold sensitivity across the selected Mediterranean case studies. For example, island environments such as Lesvos and Rhodes exhibited different threshold behavior compared with mainland forest regions such as Marmaris and Çanakkale.

Vegetation masking using the Sentinel-2 Scene Classification Layer (SCL) also contributed to improved burned area estimation by reducing the influence of non-vegetated surfaces. Excluding water bodies, urban surfaces, bare soil, and cloud-shadow regions minimized false positive classifications and reduced spectral

confusion in threshold-based mapping. This supports previous studies emphasizing the importance of land cover masking in wildfire remote sensing workflows [10].

Overall, the findings demonstrate that ΔNBR threshold performance is region-dependent and that universal threshold application across Mediterranean wildfire environments may reduce burned area estimation accuracy. The study contributes to wildfire remote sensing research by providing a comparative multi-region evaluation of threshold sensitivity using Sentinel-2 imagery and independently validated wildfire datasets.

V. CONCLUSİON

This study evaluated the sensitivity of burned area estimation to three ΔNBR thresholds (0.27, 0.44, and 0.66) using Sentinel-2 imagery across five Mediterranean wildfire events in Greece and Türkiye. The results confirm that no single ΔNBR threshold performs universally across different fire environments. The 0.44 threshold consistently produced the closest estimates where moderate-to-high severity dominated, while 0.27 was more suitable for larger, mixed-severity fires and 0.66 captured only high-severity core zones. Vegetation masking using the SCL layer reduced commission errors from non-vegetated surfaces and improved overall accuracy.

These findings carry practical implications: applying a single threshold across multiple regions can introduce substantial error, and local validation against official data remains essential. The study is limited to five case studies, and further research across additional Mediterranean fire regimes would strengthen the conclusions. Future work should explore adaptive thresholding methods and machine learning approaches that may better capture region-specific burn severity patterns.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the European Space Agency (ESA) Copernicus Programme for providing Sentinel-2 satellite imagery, and the ESA Sentinel Application Platform (SNAP) for image processing software used in this study. The authors also acknowledge the Copernicus Emergency Management Service (EMS), FIRE-RES Project, Hellenic Fire Service, and the Turkish Ministry of Agriculture and Forestry for providing wildfire reference data and technical reports used for validation purposes.

REFERENCES

[1] Copernicus Emergency Management Service, "EMSN159 Wildfire on Rhodes Island, Greece," Tech. Rep., Issue 2.0, Nov. 2023.
[2] S. Escuin, R. Navarro, and P. Fernandez, "Fire severity assessment by using NBR and NDVI derived from LANDSAT TM/ETM images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 4, pp. 1053-1073, 2008.
[3] J. San-Miguel-Ayanz et al., "Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2023," Publ. Office Eur. Union, Luxembourg, EUR 40092, 2024.
[4] Hellenic Fire Service, "Annual Statistical Report on Fire Incidents 2021," Ministry of Citizen Protection, Athens, Greece, 2022.
[5] K. Kalabokidis, P. Palaiologou, and E. Feo, "The Island of Lesbos is on the frontline to face wildfires events during Summer 2022," FIRE-RES Project, Eur. Horizon 2020, Grant No. 101037419, Aug. 2022.
[6] C. H. Key and N. C. Benson, "Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index, and Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio," in *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service, RMRS-GTR-164-CD, 2006.
[7] J. D. Miller and A. E. Thode, "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)," *Remote Sens. Environ.*, vol. 109, no. 1, pp. 66-80, 2007.
[8] E. Roteta, A. Bastarrika, M. Padilla, T. Storm, and E. Chuvieco, "Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa," *Remote Sens. Environ.*, vol. 222, pp. 1-17, 2019.
[9] M. Arianoutsou, G. Athanasakis, D. Kazanis, and A. Christopoulou, "Attica: A Hot Spot for Forest Fires in Greece," *Fire*, vol. 7, no. 12, art. 467, 2024.
[10] European Space Agency, "Sentinel-2 Level-2A Algorithm Overview." [Online]. Available: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm [Accessed: May 2026].
[11] Turkish Ministry of Agriculture and Forestry, "Canakkale Forest Fire Report," 2023. [Online]. Available: https://www.tarimorman.gov.tr/Haber/5976/Bakan-Yumakli-Canakkale-Ve-Eskisehirdeki-Orman-Yanginlarinin-Kontrol-Altina-Alindigini-Acikladi [Accessed: May 2026].
[12] Turkish Ministry of Agriculture and Forestry, "Marmaris küllerinden doğuyor," Tarım TV, Mar. 8, 2024. [Online]. Available: Tarım TV Marmaris Report [Accessed: May 2026].

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Hidrolik Disk Frenlerde Piston Geri Getirme Miktarının Sonlu Elemanlar Analizleri ile İncelenmesi

Ethem Berkay Çağlar[a], İbrahim Can Güleryüz[b], Burak Sivri[b], Furkan Yakın[b]*

[a]Ege Fren Sanayi ve Ticaret A.Ş., 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı, İzmir / Türkiye
[b]Numesys İleri Mühendislik A.Ş., Kazımdirik Mah. 372/8 Sk. No:46 Bornova, İzmir / Türkiye
[*]**Sorumlu Yazar:** berkay.caglar@egefren.com.tr

ÖZET

Bu çalışmada, hidrolik disk fren sistemlerinde kullanılan pistonların geri getirme miktarı, üç boyutlu sonlu elemanlar (SE) analizleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Üç boyutlu SE analizleri, sayısal sonuçların deneysel piston geri getirme miktarı testi sonuçları ile karşılaştırılabilmesi amacıyla 30, 60, 90 ve 110 bar hidrolik basınç seviyeleri için gerçekleştirilmiş ve sistemin davranışı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, literatürde yer alan deneysel piston geri getirme miktarı testi sonuçları ve iki boyutlu SE analizi sonuçları göz önünde bulundurularak, karşılaştırılmış ve üç boyutlu sayısal modelin doğruluğu değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, deneysel veriler ile iki boyutlu SE analiz sonuçları arasında yaklaşık %20 seviyesinde bir fark bulunduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, bu çalışma kapsamında geliştirilen üç boyutlu SE modeli ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle daha uyumlu olduğu ve maksimum farkın %12 seviyesine kadar düştüğü görülmüştür. Elde edilen bulgular, üç boyutlu modellemenin piston geri getirme davranışının daha doğru temsil edilmesine önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Geri getirme fonksiyonu, Hidrolik disk fren, Keçe kanalı, Piston keçesi, Sonlu elemanlar analizi.*

Investigation of Piston Roll-Back Function in Hydraulic Disc Brakes Using Finite Element Analysis

ABSTRACT

In this study, the piston roll-back behavior in hydraulic disc brake systems was numerically investigated using three-dimensional finite element (FE) analyses. The analyses were performed at hydraulic pressure levels of 30, 60, 90, and 110 bar to enable comparison of the numerical results with experimental piston roll-back test data, and the system response was evaluated in detail. The obtained numerical results were compared with experimental piston roll-back test data reported in the literature, as well as with two-dimensional FE analysis results, in order to assess the accuracy of the three-dimensional numerical model. The comparisons indicated that the discrepancy between the experimental data and the two-dimensional FE analysis results was approximately 20%. In contrast, the results obtained from the three-dimensional FE model developed in this study showed better agreement with the experimental data, with the maximum difference reduced to approximately 12%. These findings demonstrate that three-dimensional modeling provides a more accurate representation of piston roll-back behavior.

Keywords: *Roll-back function, Hydraulic disc brake, Seal groove, Piston seal, Finite element analysis.*

I. GİRİŞ

Fren sistemleri aracın güvenli bir şekilde durmasını sağlayan alt sistemlerin başında gelmektedir. Disk fren sistemi, tekerleğe bağlı dönen bir diskin, baskı kuvveti ile sıkıştırılan balatalar aracılığıyla yavaşlatılması prensibine dayanır. Hidrolik disk frenler, hidrolik basıncı ile pistonların balatalara baskı kuvveti uygulaması sonucunda frenlemeyi sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerde fren diski, kaliper ve balata

tasarımları, frenleme sonrası pistonları frenleme öncesi konumuna geri getiren mekanizmalar ve sürtünme çiftinin termal davranışı gibi faktörler fren performansını belirler (Rashid, A., 2014). Kaliper gövdesinin geometrisi ve yapısal rijitliği, fren performansı ve piston hareket karakteristiği üzerinde doğrudan etkili olup, bu bileşenin tasarımının optimizasyonu fren sisteminin genel davranışı açısından büyük önem taşımaktadır (Tekbaş ve Güleryüz, 2023).

Hidrolik disk frenlerde, pistonlar hidrolik basınç etkisi altında balataları fren diskine doğru hareket ettirerek balata baskı kuvvetinin oluşmasını sağlamaktadır. Fren basıncının ortadan kalkmasıyla birlikte pistonların belirli bir miktar geri gelmesi, balatalar ile fren diski arasında çalışma boşluğunun oluşmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma boşluğu, frenleme performansı, frenlerde kalıntı sürtünme oluşumu ve bileşenlerin servis ömrü açısından kritik öneme sahiptir (Güntay ve ark., 2022).

Hidrolik disk fren sistemlerinde piston geri getirme davranışı ve kalıntı fren torku üzerine yapılan çalışmalar, piston geri getirme mekanizmasının yalnızca kaliper seviyesinde değil, tüm araç fren sistemi performansı açısından kritik bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır (Cai & Anwana, 2002).

Piston geri getirme fonksiyonu, temel olarak piston keçesinin elastik deformasyon karakteristiği ile sağlanmaktadır. Frenleme sırasında hidrolik basınç etkisi ve pistonun yer değiştirmesi altında deforme olan piston keçesi, basıncın kaldırılmasıyla elastik geri toparlanma davranışı göstererek pistonun başlangıç konumuna doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Bu mekanizma; keçe malzemesi, keçe kesit geometrisi, keçe kanalı geometrisi gibi birçok tasarım parametresinden etkilenmektedir. Buna ek olarak, piston yüzey pürüzlülüğü, piston kaplama özellikleri ve kaliper gövdesinin rijitliği gibi faktörlerin de piston geri getirme miktarı üzerinde doğrudan etkili olduğu literatürde belirtilmektedir (Backström, 2011).

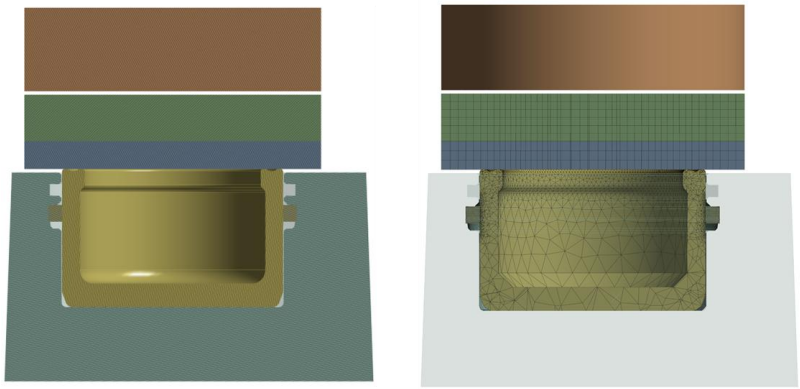
Literatürde hidrolik disk fren piston geri getirme mekanizmasının incelenmesine yönelik çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yer almaktadır. Hidrolik disk fren sistemlerinde, piston geri getirme mekanizmasının davranışı, genellikle literatürde iki boyutlu sonlu elemanlar (SE) analizleri ve deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiş; farklı hidrolik basınç seviyelerinde, piston geri getirme miktarı hesaplanmıştır ve deneysel yöntemle karşılaştırılmıştır (Çınarcık ve ark., 2023).

Literatürde yer alan diğer bir çalışmada, piston keçesi ve keçe kanalı geometrisinin piston geri getirme davranışı üzerindeki etkileri iki boyutlu SE analizleri ve deneysel ölçüm sonuçları göz önünde bulundurularak irdelenmiştir. Özellikle keçe kanalı geometrisinin piston geri getirme miktarı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmüştür (Anwana ve ark., 2002). Piston keçesinin frenleme sırasında depoladığı elastik enerjinin piston geri getirme miktarının bir göstergesi olduğunu öne sürülmüş ve bu yaklaşımlar iki boyutlu SE analizleri ile desteklemiştir (Cai ve Anwana, 2002).

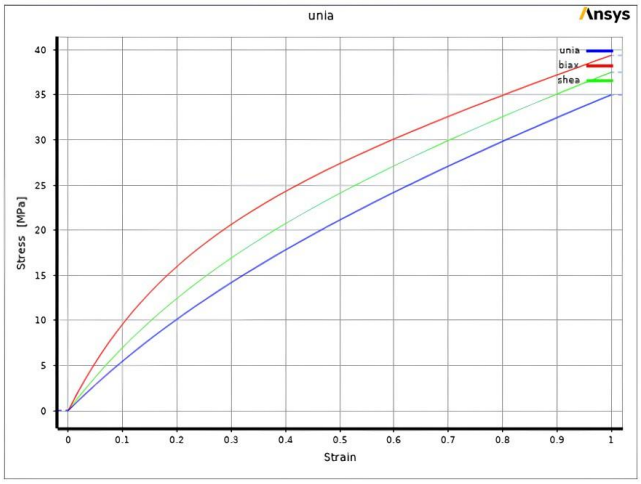
Bu çalışmada, literatürde iki boyutlu SE analizleri ile sayısal olarak ele alınan hidrolik disk fren piston geri getirme fonksiyonu üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Piston keçesi, keçe kanalı ve piston geometrileri üç boyutlu olarak modellenmiş; farklı hidrolik basınç seviyeleri altında piston geri getirme miktarı sayısal olarak hesaplanmıştır. Elde edilen üç boyutlu analiz sonuçları, literatürde yer alan iki boyutlu analizler ve deneysel ölçüm verileri ile karşılaştırılarak, modelleme yaklaşımlarının doğruluğu değerlendirilmiştir. Böylece, yeni ürün geliştirme süreçlerinde piston geri getirme davranışının belirlenmesinde kullanılmak üzere doğrulanmış bir üç boyutlu sayısal analiz modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

Hidrolik disk fren sistemlerinde pistonun geri getirme davranışının sayısal olarak incelenebilmesi amacıyla, bu çalışmada Ansys Mechanical yazılımı kullanılarak üç boyutlu SE analizleri gerçekleştirilmiştir. SE analiz modeline montaj ve hizmet koşulları göz önünde bulundurularak; piston, piston keçesi, pistonun kaliper gövdesi üzerinde yataklandığı yuva, iç balata ve fren diski kesitleri dâhil edilmiştir (Şekil 1-(a)). Sayısal modelde kaliper gövdesi, fren diski, piston ve balata sırt sacı, bileşenleri yapısal çelik malzeme özellikleri ile tanımlanmıştır. Piston keçesinin mekanik davranışını temsil edebilmek için hiperelastik Neo-Hookean malzeme modeli kullanılmış olup, ilgili gerilme–şekil değiştirme ilişkisi Şekil 1(c)'de sunulmaktadır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Sayısal çözümde kullanılan SE ağı SpaceClaim yazılımında oluşturulmuş olup, ağ yapısına ait genel görünüm Şekil 1(b)'de verilmiştir. Oluşturulan model toplamda 169.171 düğüm noktası ve 393.571 elemandan meydana gelmektedir.



(a) (b)



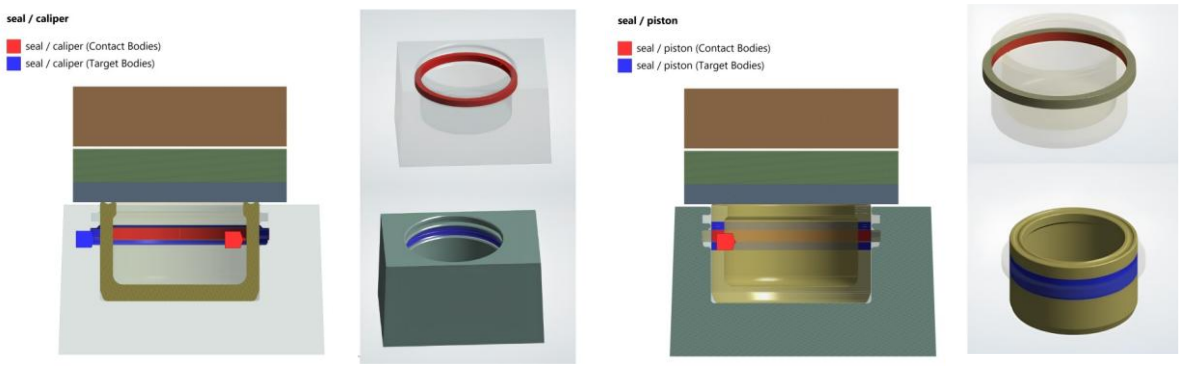
(c)

Şekil-1. (a) SE analiz modeli, (b) SE analiz ağ yapısı, (c) Neo Hookean malzeme modeline ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Çınarcık ve ark., 2023)

Tablo 1. Malzeme özellikleri (Çınarcık ve ark., 2023)

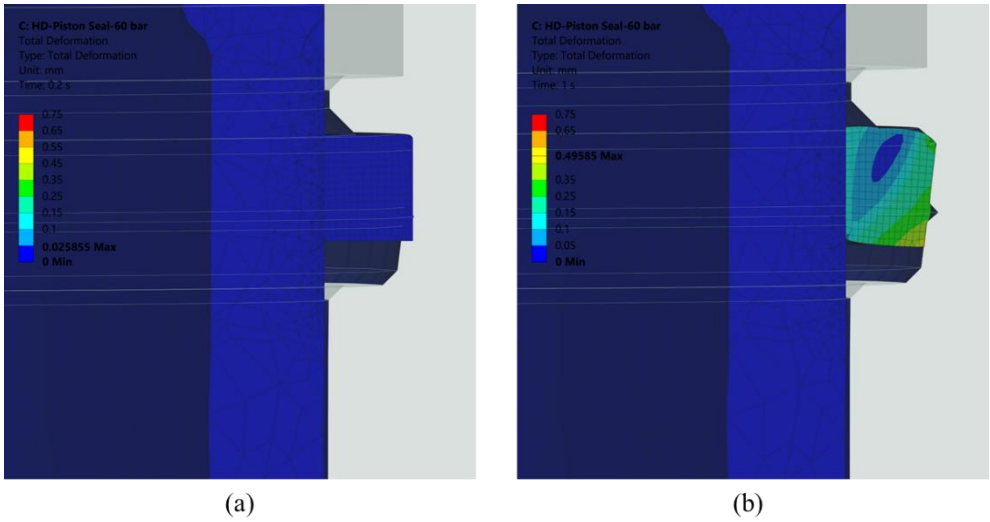
	Yapısal çelik	**Balata sürtünme malzemesi**
Young modülü [GPa]	200	0,998
Poisson oranı [-]	0,3	0,29
Yoğunluk [kg/m^3]	7850	1900

Hidrolik piston keçesi ile kaliper yuvası, hidrolik piston keçesi ile piston arasında sürtünme katsayısı 0,34 olan sürtünmeli temas (frictional contact) tanımlanmıştır (Şekil 2-(a), Şekil 2-(b)). Kaliper yuvası ile piston ve balata ile fren diski arasında sürtünmesiz temas (frictionless contact) tanımlanmıştır. Tüm sürtünmeli ve sürtünmesiz temas tanımlamalarında Augmented Lagrange formülasyonu seçilmiştir. Balata sürtünme malzemesi ile balata sırt sacı arasında yapışık temas (bonded contact) tanımlanmıştır. Kaliper yuvası ve disk için, bağlantı tipi olarak gövde-zemin bağlantısı (body-ground joint) tanımlanmıştır. Balata sırt sacına, piston ekseni doğrultusunda, doğrusal hareketli mafsal bağlantısı (translational joint) tanımlanmıştır. Balata sırt sacı ile piston arasında sabit mafsal bağlantısı (fixed joint) tanımlanmıştır.



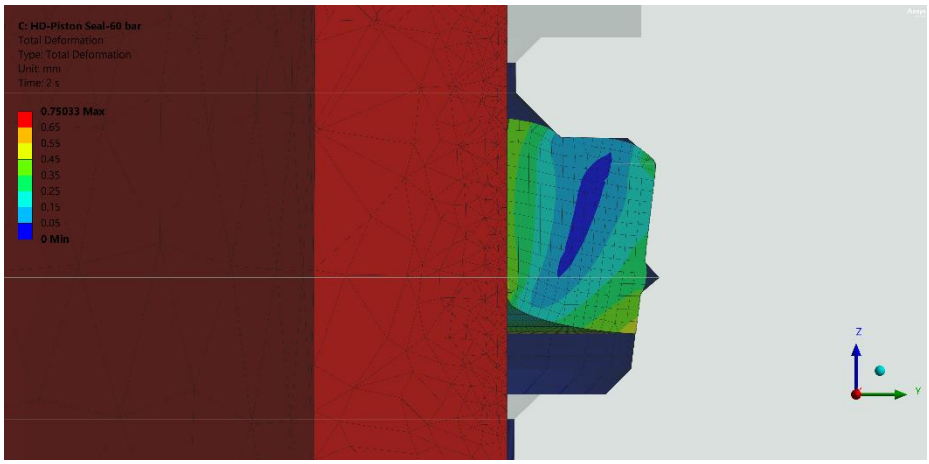
Şekil-2. (a) Hidrolik piston keçesi ile kaliper yuvası, (b) Hidrolik piston keçesi ile piston arasındaki temaslar

SE analizlerinde piston keçesi serbest formunda, piston ve kaliper gövdesi ile girişimli olacak şekilde modellenmiştir (Şekil-3(a)). SE analizleri, beş adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, hidrolik piston keçesi ile kaliper gövdesi üzerindeki keçe kanalı arasındaki geçmenin çözümü gerçekleştirilerek, sistemin başlangıç durumundaki montaj koşulu elde edilmiştir (Şekil 3(b)).



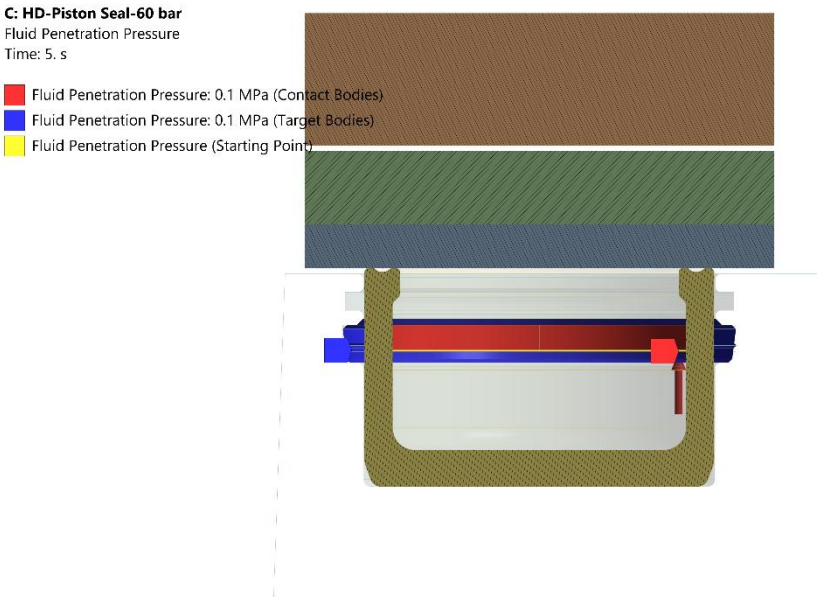
Şekil-3. (a) SE modelinde piston keçesinin durumu, (b) birinci adım çözümünde keçenin keçe kanalı içerisindeki şekil değiştirmesi

İkinci adımda pistona, pozitif y ekseni yönünde 0,75 mm büyüklüğünde bir yer değiştirme uygulanmıştır. Diğer adımlarda, pistona tanımlanan bu yer değiştirme kısıtı kaldırılarak pistonun serbest davranışı incelenmiştir (Şekil-4).



Şekil-4. İkinci adım çözümünde piston keçesinin şekil değiştirmesi

Üçüncü ve dördüncü adımlarda, piston yüzeylerine belirlenen hidrolik basınç yükü tanımlanarak frenleme durumu temsil edilmiştir. Dördüncü adımda, piston keçesinin hidrolik sıvısı ile temas eden bölgelerine belirlenen hidrolik basıncı uygulanmaktadır (Şekil-5).



Şekil-5: Dördüncü adımda hidrolik sıvısının piston keçesine hidrolik basıncı uygulandığı bölgeler

Beşinci adımda, piston ve piston keçesi üzerinde etkili olan hidrolik basınç yükleri kaldırılarak frenin serbest bırakılması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Sayısal analizler, 30 bar, 60 bar, 90 bar ve 110 bar olmak üzere dört farklı hidrolik basınç seviyesi için gerçekleştirilmiştir. Her bir basınç seviyesi için pistonun geri getirme miktarı, çözüm sürecinin ikinci adımında elde edilen piston konumu ile basıncın tamamen kaldırıldığı beşinci adımdaki piston konumu arasındaki yer değiştirme farkı dikkate alınarak belirlenmiştir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada karşılaştırma için kullanılan iki boyutlu SE analizi ve deneysel piston geri getirme verileri, literatürde yer alan Çınarcık ve ark çalışmasından referans alınmıştır. Söz konusu çalışmada, farklı hidrolik basınç seviyeleri için piston yer değiştirme miktarları deneysel olarak ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilir olduğu raporlanmıştır (Çınarcık ve ark, 2023). Bu çalışmada, üç boyutlu SE analizleri ile elde edilen sonuçlar ile literatürdeki referans iki boyutlu SE ve deneysel piston yer değiştirme miktarı sonuçları karşılaştırılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Deneysel ve iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) SE analizi sonuçların karşılaştırılması

Basınç, bar	**Piston yer değiştirme**				
	Deney, mm	**2B SE Analizi**		**3B SE Analizi**	
		Değer, mm	**Fark, mm (%)**	**Değer, mm**	**Fark, mm (%)**
30	0,409	0,379	0,030 (%7,3)	0,376	-0,033 (%-8,1)
60	0,409	0,364	0,045 (%16,9)	0,415	0,006 (%1,5)
90	0,416	0,347	0,069 (%16,6)	0,459	0,043 (%10,3)
110	0,421	0,338	0,083 (%19,6)	0,473	0,052 (%12,4)

SE analizlerinden elde edilen sonuçlar, önceki çalışmada raporlanan iki boyutlu analiz bulguları ile birlikte değerlendirildiğinde; 30 bar hidrolik basınç seviyesinde iki boyutlu model için deneysel sonuçlara göre %7,3'lük bir fark gözlemlenirken, üç boyutlu analizde bu farkın %8,1 olduğu belirlenmiştir. 30 bar basınç seviyesi dışında kalan tüm basınç seviyelerinde, üç boyutlu SE analizleri ile elde edilen piston geri getirme miktarlarının, iki boyutlu analiz sonuçlarına kıyasla deneysel verilere daha yakın olduğu görülmüştür. En yüksek farkın 110 bar hidrolik basınç seviyesinde %12,4 olarak hesaplanmasına rağmen, üç boyutlu modelleme yaklaşımının genel olarak deneysel eğilimleri daha iyi temsil ettiği

değerlendirilmektedir. Bu bulgular, önerilen üç boyutlu SE analiz yönteminin hidrolik disk fren sistemlerinin tasarım ve geliştirme süreçlerinde piston geri getirme davranışının tahmininde etkin bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, hidrolik disk fren sistemlerinde farklı hidrolik basınç seviyelerinin hidrolik piston geri getirme fonksiyonunun üzerindeki etkisi üç boyutlu sayısal analizler ile ele alınmıştır. Literatürde yer alan farklı hidrolik basınç seviyeleri için deneysel ölçüm sonuçları ve iki boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçları referans alınarak, bu çalışma kapsamında piston geri getirme fonksiyonu üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile yeniden ele alınmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, yüksek basınç seviyeleri için üç boyutlu analizlerin iki boyutlu analizlere kıyasla deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. SE analizleri ve deneysel veriler arasındaki en yüksek farkın her iki analiz yöntemi için 110 bar basınç seviyesinde olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar ile iki boyutlu SE analizi sonuçları arasındaki en yüksek fark %19,6; deneysel sonuçlar ile üç boyutlu SE analizi sonuçları arasındaki en yüksek fark %12,4 olarak elde edilmiştir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, iki boyutlu SE analiz yaklaşımına göre önerilen üç boyutlu SE analiz yaklaşımının, hidrolik disk frenlerin tasarım ve geliştirme süreçlerinde piston geri getirme miktarının öngörülmesinde etkin ve güvenilir bir mühendislik aracı olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar sağlanan imkânlardan dolayı Ege Fren San. ve Tic. A.Ş. ve Numesys İleri Mühendislik A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

[1] Cınarcık, Z., Güleryüz, İ. C., & Yılmaz, Ö. C. (2023). Hidrolik disk frenlerde piston geri getirme fonksiyonunun sayısal ve deneysel olarak incelenmesi. Proceedings of the 2nd International Congress on Engineering and Sciences, İstanbul, Türkiye.

[2] Rashid, A. (2014). Overview of automotive disc brake system design and performance. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 9(3), 210–226.

[3] Tekbaş, U., & Güleryüz, İ. C. (2023). Ağır hizmet araçlarında kullanılan hidrolik disk fren kaliper yuvasının topoloji optimizasyonu. Proceedings of the 3rd International Symposium on Automotive Science and Technology.

[4] Güntay, B., Baltacı, A., Kireçci, C., Yılmaz, Ö. C., & Gürses, O. (2022). The effect of the running clearance on the braking force. International Journal of Automotive Science and Technology, 6(4), 404–411.

[5] Backström, A. (2011). Brake drag fundamentals (SAE Technical Paper No. 2011-01-2377). SAE International.

[6] Anwana, O. D., Cai, H., & Chang, H. T. (2002). Analysis of brake caliper seal-groove design. SAE Transactions, 111, 1316–1324.

[7] Cai, H., & Anwana, O. D. (2002). Elastic energy storage of hydraulic brake seals and its effect on piston retraction (SAE Technical Paper No. 2002-01-2580). SAE International.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

NFC Tabanlı Sistemler için İnovatif Kilit Mekaniği Tasarımı: EcoKey

Coşkun Harmanşah[a], Esma Nur Savrangüler[b], Hüseyin Garip[c], Kamran Israyilov[d]*

[a]Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, İzmir/Türkiye.
[b]Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa/Türkiye.
[cd]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** coskun.harmansah@ege.edu.tr

ÖZET

Günümüzde mekanik kilit sistemleri, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla hızlı bir dönüşüm geçirmektedir. Bu sistemler geleneksel donanımın sınırlamalarını aşmak için enerji hasatlama teknolojilerini kullanarak yeni düşük güç tüketimli mekanik tasarımlara dönüşmektedir. Bu çalışmada, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan, mobil aygıt üzerindeki NFC (Near Field Communication-NFC) sinyallerinin enerji hasatlama teknolojisi kullanarak mekanik kilit sisteminin çalışması sağlayabilecek bir inovatif Ecokey sistem tasarımı yapılmış ve prototipi geliştirilmiştir. Pilli akıllı kilit sistemleri, Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) yaygınlaşmasıyla birlikte gelişmiş olsa da, pil ömrü ve enerji verimliliği hâlâ kritik bir konudur. Standart pillerle çalışan modeller, yüksek bakım gereksinimleri, enerji bağımlılığı ve çevresel sürdürülebilirlik sorunları gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Ecokey sistemi, NFC aracılığıyla enerji toplayarak kompakt bir mekanik yapı içinde güvenli kilitleme ve kilit açma işlemleri gerçekleştirerek bu dezavantajları ortadan kaldırmaktadır. Çalışma kapsamında akıllı kilit sisteminin mekanik tasarımları CAD tabanlı yazılımla modellenmiş ve açma ve kapama mekanizmaları simüle edilmiştir. Mekanik tasarımların W_{teorik} ve W_{pratik} değerleri, Tasarım-1 için 0.011 J ve 0.034 J iken Tasarım-2 için 0.8 mJ ve 0.0029 J olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, EcoKey kilit sisteminin kişisel kullanımdan endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir kullanım potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Akıllı kilit sistemleri, Düşük enerji tüketimli mekanikler, Enerji hasatlama, Mekanik tasarım.*

Innovative Mechanical Design for NFC-Based Systems: EcoKey

ABSTRACT

Today, mechanical locking systems are undergoing a rapid transformation driven by the widespread adoption of Internet of Things (IoT) technologies. These systems are evolving into new low-power mechanical designs that utilize energy harvesting technology to overcome limitations of traditional hardware. In this study, an innovative design Ecokey system was developed and prototyped as an electromechanical locking solution that operates without external power source by harvesting energy from Near Field Communication (NFC) signals emitted by mobile devices. Although battery-powered smart lock systems have advanced alongside the widespread adoption of the IoT, battery life and energy efficiency remain critical issues. Standard batteries powered versions suffer from significant disadvantages, including high maintenance requirements, energy dependency, and environmental sustainability issues. The Ecokey system addresses these disadvantages by performing secure locking and unlocking operations within a compact mechanical structure by harvesting energy via NFC. Within the scope of this research, the mechanical designs of the smart lock system were modeled using CAD-based software, and the opening and closing mechanisms were simulated. The theoretical and practical values of mechanical designs were calculated as 0.011 J and 0.034 J for Design-1, and 0.8 mJ and 0.0029 J for Design-2, respectively. The obtained results demonstrate that the EcoKey lock system has broad potential, ranging from personal use to industrial applications.

Keywords: *Smart locking systems, Low-Power mechanics, Energy harvesting, Mechanical design.*

I. GİRİŞ

Kilit sistemleri, geleneksel mekanik yapılardan modern elektromekanik sistemlere doğru dönüşüme uğramıştır. Güncel olarak kilit sistemleri, pilli akıllı çözümler üzerine yoğunlaşmak ile dört kategoride geliştirilmektedir. Bunlar; silindirik pim-şifreli (pin-tumbler) mekanik kilitler, selenoid kilitler, pilli akıllı ve pilsiz akıllı kilitlerdir. Mekanik kilitler gövde, tapa ve yaylı pimler gibi yapısal bileşenlerden oluşmaktadır. Bu kilitler; çarpma (bumping), toplama (picking) ve germe (racking) gibi manipülatif açma yöntemleri kullanılarak çalıştırılmaktadır. Selenoid kilitler; devre, bobin, metal pim veya sürgüden (plunger) oluşmaktadır. Kilit sistemleri, kullanım alanına uygun olarak 3V-24V aralığında bobine enerji uygulandığında oluşan manyetik alan içerisindeki metal pim ileri-geri hareket ederek açılıp kapanmaktadır. Endüstri 4.0 devrimiyle birlikte Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) teknolojilerinin her alanda yaygınlaşması kilit sistemleri ve uygulamalarına yeni bir boyut katmıştır. Geleneksel mekanik kilitlerin güvenlik açıkları özellikle anahtar kayıpları veya yetkisiz kopyalamalar gibi riskler, bu dönüşümü hızlandırmıştır. Elektrikli kilit sistemleri özellikle uzaktan kontrol imkanları ve gelişmiş güvenlik protokollerine sahip Wi-Fi, Bluetooth ve RFID gibi kablosuz iletişim teknolojileri ile çalışan cihazların artmasıyla birlikte akıllı kilit sistemlerine dönüşerek endüstriden kişisel kullanıma kadar birçok alanda giderek yaygınlaşmaktadır [1, 2, 3]. NFC destekli pilsiz IoT uygulamalarının özellikle güç yönetimi ve enerji hasatlama kapsamında düşük güçlü mikrodenetleyici ve süperkapasitör teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte farklı alanlarda kullanım potansiyeli taşımaktadır [4]. Bu sistemler; özellikle güvenlik, gizlilik ve kullanım kolaylığı açısından önemli yenilikler sunmakta ve anahtar veya şifre kullanımına dayalı karşılaşılabilecek sorunlara pratik çözümler getirmektedir [5]. Geleceğin kilit sistemleri enerji hasatlama optimizasyonu ve düşük güç mekaniğinin NFC tabanlı yapılara entegre edilmesiyle pil bağımlılığını ortadan kaldırılarak sürdürülebilir ve çevreci çözümlere dönüşecektir. Bu çalışma, NFC tabanlı yenilikçi düşük güç tüketimli kilit mekanizması tasarımı, prototip üretimi, enerji hasatlama optimizasyonu ve elektronik testleri içermektedir.

II. LİTERATÜR

NFC enerji hasatlama ile çalışan bataryasız akıllı kilit sistemlerinde; motorun ilk kalkışı için minimum enerji harcanmasını sağlayan düşük sürtünmeli çekirdeksiz DC motor (20-50 mW) kullanımı ve kilidin açılması sürecinde enerji verimliliği için dönüş açısının minimize edilmesi kritik faktörlerdir [6]. NFC ile bulut bilişim teknolojilerini birleştirerek akıllı asma kilit sistemlerinde erişim denetimini iyileştirmeyi hedefleyen bir çalışmada yazılım odaklı bir stratejiyle verimlilik artışı ve mobil uygulamalarda kullanılan dijital anahtarların fiziksel tepki süreleri detaylı incelenmiştir [7]. Bulut bağlantılı bir kapı kilit prototipinin fiziksel yapısı, çalışma senaryoları ve mühendislik altyapısının değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışmada, özellikle internet kesintileri sırasında kilidin "offline" modda güvenle çalışabilmesi için kilit kontrolcüsü ile fiziksel aparat arasındaki yerel yetkilendirme etkileşimini ele alarak modern akıllı kilitlerin mekatronik sistemlerle entegre edilerek tasarlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır [8]. Akıllı kilit sistemleri üzerine; IoT tabanlı akıllı kilit sistemlerinin tasarım sürecinde bileşenlerin fiziksel yerleşimi (packaging) ve ergonomisi [9], NodeMCU mikrodenetleyicisi ile elektromekanik bileşenlerin güç tüketiminin azaltılması [10], parmak izi ve RFID teknolojilerini hibrit bir yapıda birleştiren inovatif bir kilit sistemi tasarımı [11], parmak izi ve NFC tabanlı kimlik doğrulama sistemlerinin kilit mekanizmasının entegrasyonu [12], düşük maliyetli bir NFC kapı kilidi tasarımının farklı kapı tiplerine mekanik adaptasyonu [13] ve geleneksel kilit sistemlerinin yerini alacak solenoid kilit tabanlı bir RFID protokolü geliştirerek geleneksel kilit sistemlerinin yerini alacak solenoid kilit tabanlı bir RFID sistemin modülerliği [14] çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

III. MATERYAL METOT

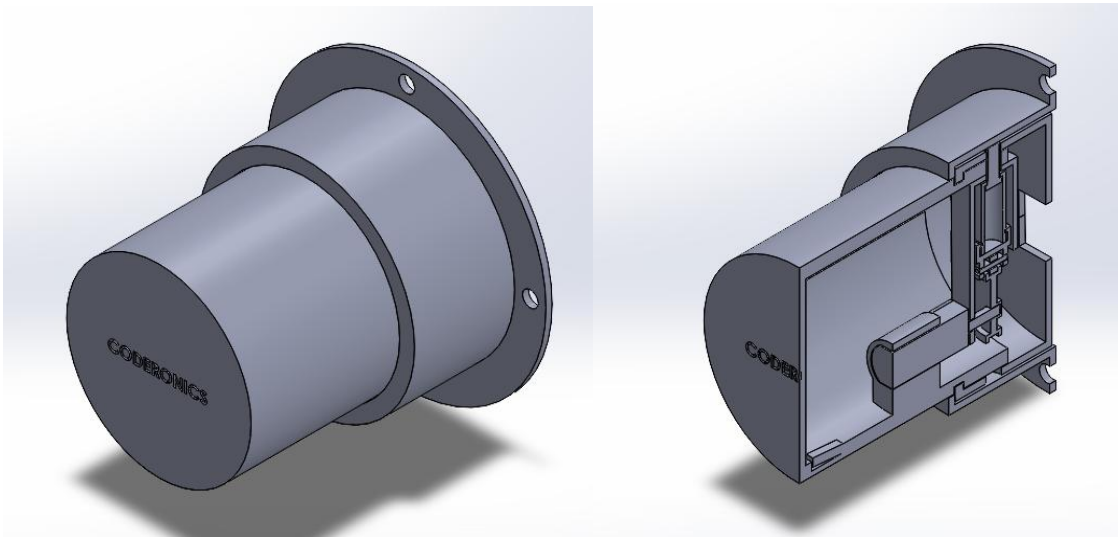
Çalışmamızda ilk olarak enerji hasatlama uyumlu çalışabilen düşük akım tüketimli mikrodenetleyicilerin düşük enerjili motorlara elektromekanik entegrasyonunu üzerine odaklanılmıştır. Bu amaçla geliştirdiğimiz yenilikçi tasarımda, 6V aralığında çalışan 60 rpm'lik Aslong motor kullanılmıştır. Ecokey akıllı pilsiz kilit sisteminin mekanik bileşenlerinin tasarımı ve sisteme entegrasyonu süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir:

A. Geometrik Modelleme

Düşük güç tüketim Kilit sistemi gereksinimlerine uygun Mekanik Bilgisayar Destekli Tasarım (Mechanical Computer-Aided Design-MCAD) ortamında farklı özelliklerde kilit mekanizmalarının 3 boyutlu modellemesi yapılmıştır.

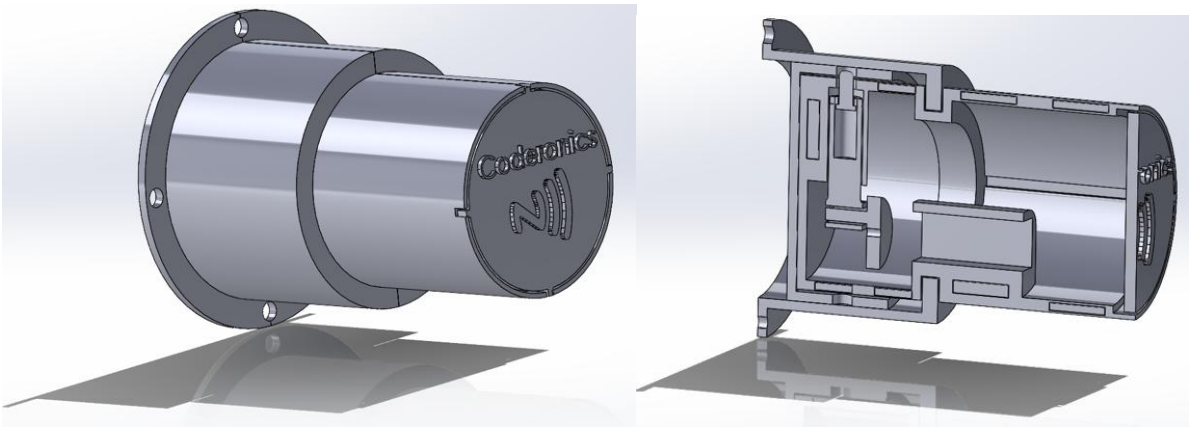
Tasarım-1: Motor miline asimetrik bağlanan kam mekanizması ve sadece doğrusal yörüngede ilerleyebilen bir kilit piminden oluşmaktadır. Tasarımda güç aktarım organı olarak kullanılan kam

mekanizması, motordan elde edilen dairesel hareketi kilit piminin ihtiyaç duyduğu doğrusal harekete dönüştürmektedir. Tasarımdaki 2.25 mm'lik asimetri sayesinde motor yarım tur döndüğünde, kilit pimi 4.5 mm ilerleyerek kilit yuvasına yerleşmektedir. Kilit kapalıyken pime dışarıdan bir darbe veya zorlama uygulandığında, bu kuvvet motoru geri döndürememektedir. Gelen tüm zorlama kuvveti doğrudan motor milinin merkezine iletildiği için sistem, dış müdahalelere karşı fiziksel güvenlik sunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Mekanik tasarım-1

Tasarım-2: Motorun dairesel hareketi, Scotch Yoke mekanizması aracılığıyla pimin yuvaya tam uyumla geçmesini sağlayan doğrusal harekete dönüştürülmektedir. Kilitleme işlemi motorun 180° tekil hareketiyle gerçekleşirken, Hall Effect sensörü mıknatıs yardımıyla bu açıyı algılayarak motoru hassas bir şekilde durdurmaktadır. Pimin yuva ile hizalanamadığı durumlarda üretilen mekanik enerji sistemdeki yay üzerinde depolanmakta ve kullanıcı kilidi manuel döndürüp hizayı yakaladığı anda bu enerji pimin güvenle yuvaya oturmasını sağlamaktadır. Minimum bileşen sayısı sayesinde sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını en aza indiren bu sistemde, kilit açma ve mekanik döngünün tamamlanması kapı kolunun manuel olarak döndürülmesiyle gerçekleştirilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Mekanik tasarım-2

B. Elektromekanik Matematiksel Modeli

Ecokey sisteminin enerji gereksinimlerini ve operasyonel çalışma sürelerini belirlemek amacıyla, seçilen motorun mekanik çıktıları ve mekanizmanın iş yükü matematiksel olarak modellenmiştir.

1) Tasarım-1 Kam Mekanizması: Tasarımda güç aktarım organı olarak kullanılan kam (cam) mekanizması, tahrik motorundan elde edilen dairesel hareketi kilit piminin ihtiyaç duyduğu doğrusal harekete dönüştürmekle görevlidir. Sistem temel olarak, motor miline eksantrik olarak bağlanan döner bir kam profili ve bu profilin dış yüzeyi ile sürekli temas halinde kalarak kılavuzlar içinde sadece doğrusal

yörüngede ilerleyebilen bir kilit piminden (izleyici) oluşmaktadır. Tahrik motoru çalıştırıldığında, kamın asimetrik eksen yapısı nedeniyle dönme merkezi ile temas yüzeyi arasındaki radyal mesafe sürekli olarak değişmekte ve bu durum yataklanmış kilit pimini ileri yönlü itmektedir. Ecokey sisteminin tasarım parametrelerine göre belirlenen 2.25 mm'lik eksantriklik (e) değeri, motor milinin 180°'lik dönüşüyle kilit piminin tam olarak 4.5 mm'lik bir strok boyuna ulaşmasını ve kilit yuvasına güvenle yerleşmesini sağlamaktadır.

Bu mekanizmanın akıllı kilit sistemlerine sunduğu en kritik mühendislik avantajı ise tersine sürülemez yapısıdır. Kilit tam kapalı konumdayken pime dışarıdan uygulanabilecek herhangi bir manipülatif darbe veya zorlama kuvveti, mekanizmayı geriye doğru itememekte; oluşan lineer kuvvet, kamı ters yönde döndürecek bir tork yaratmak yerine doğrudan motor milinin eksen merkezine iletilmektedir. Bu özellik sayesinde sistem, düşük güç tüketimli minyatür bir motor kullanmasına rağmen dış müdahalelere karşı yüksek düzeyde fiziksel güvenlik sunmaktadır.

1.1) Motor Çıkış Gücü ve Kinematik Değerler

Tablo 1'de çalışmamızda kullandığımız motorun elektriksel ve mekaniksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Motor ve teknik özellikleri

Tasarımlarda Kullanılan Motor	Özellikler
	Çalışma Voltajı: 6V Nominal Hız: 60 RPM Maksimum Tork: 4 kg/cm Zorlanma Akımı (Stall Current): 0,45 A Ağırlık: 9,5 g Düşük enerji tüketimi Redüktör Tipi: Dişli Redüktörlü

Sistemde tahrik elemanı olarak kullanılan redüktörlü DC motorun nominal tork (T) değeri 4 Kgf.cm'dir. Uluslararası Birimler Sistemine (SI) göre tork değeri Newton-metre (Nm) cinsinden Denklem 1' deki gibi ifade edilir:

$$T(Nm) = T(kg/cm) \times 0.09807 = 4 \times 0.0980 = 0.39228\ Nm \quad (1)$$

Motorun açısal hızı (ω), 60 RPM nominal devir üzerinden rad/s cinsine (Denklem 2) dönüştürülmüştür:

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60} = \frac{2\pi \times 60}{60} = 6.28\ \text{rad/s} \quad (2)$$

Bu veriler doğrultusunda, motor milinden elde edilen teorik mekanik güç ($Pmek$) hesaplanmıştır:

$$Pmek = T \times \omega = 0.39228 \times 6.28 = 2.46\ W \quad (3)$$

1.2) Kam Mekanizması Kuvvet İletimi

Dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştüren kam mekanizmasında, sistemin eksantrikliği (e), toplam kilit pimi stroğunun (4.5 mm) yarısı olarak tasarlanmıştır. Bu durumda, kamın pime uyguladığı teorik lineer itme kuvveti F, Denklem 4' de verilmiştir:

$$F = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{e}} = \frac{0.39228}{0.00225} = 174.35\ \mathrm{N} \quad (4)$$

Mekanik sürtünme kayıpları dikkate alınarak sistem verimi %70 varsayıldığında, elde edilen net itme kuvveti 122 N olarak hesaplanmıştır.

1.3) Mekanik İş ve Yay Potansiyel Enerjisi

Kilit mekanizmasının içerisinde, pimi geri itmekle görevli iç içe geçmiş iki adet paralel yay bulunmaktadır. Paralel yayların eşdeğer yay sabiti (keş), dış yay (0.67 N/mm) ve iç yayın (0.2 N/mm) rijitlik katsayılarının toplanmasıyla elde edilmiştir:

$$k_{eş} = k_{dış} + k_{iç} = 0.67 + 0.2 = 0.87\ Nm = 870\ Nm \quad (5)$$

Pimin 4.5 mm strok boyunca ilerlemesi için yaylar üzerinde yapılması gereken teorik mekanik iş (elastik potansiyel enerji), Hooke Yasası'na dayalı enerji denklemiyle hesaplanmıştır:

$$W_{teorik} = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 870 \times 0.0045^2 = 0.0088\ J \quad (6)$$

Tasarım güvenilirliğini artırmak adına; yaylardaki ön sıkışma kuvvetleri, olası kirlenme ve imalat toleranslarından kaynaklanacak kayıplar ~%20 olarak hesaba katıldığında mekanizmanın pratik olarak ihtiyaç duyacağı mekanik enerji (W_{mek})0.011 J olarak bulunmuştur.

1.4) Toplam Elektriksel Enerji

Mekanik sistemin ihtiyaç duyduğu 0.011 J' lük işin gerçekleştirilebilmesi için motora verilmesi gereken elektriksel enerji (E_{elek}), sistemin toplam verimine (n_{toplam}) bağlıdır. Motor verimi (%50), mekanik aktarım verimi (%70) ve sürücü devre kayıpları (~%10) birleştirilerek toplam sistem verimi 0.32 olarak belirlenmiştir:

$$E_{elek} = \frac{W_{mek}}{n_{toplam}} = \frac{0.011}{0.32} = 0.034\ \text{J} \quad (7)$$

2) Tasarım-2 Scotch Yoke Mekanizması: Geleneksel kilit sistemleri, tarihsel gelişimleri boyunca mekanik yapılardan elektromekanik sistemlere doğru evrilmiştir. Literatürde bu sistemler üç ana kategoride incelenmektedir: Silindirik pim-şifreli (pin-tumbler) mekanik kilitler, endüstriyel selenoid kilitler ve modern pilli akıllı erişim sistemleri. Mekanik kilitlerin pasif güvenlik seviyeleri; gövde, tapa ve yaylı pimlerden oluşan yapısal bileşenlerinin çarpma (bumping), toplama (picking) ve germe (racking) gibi manipülatif açma yöntemleriyle kısıtlanmakta ve zayıf kalmaktadır.

Endüstriyel solenoid kilitleri ise çalışmadıkları durumda bile 12V DC gerilimde 1,2W (0,1A) gibi yüksek bir güç tüketimi sergileyerek sürekli enerji beslemesine bağımlı kalmaktadır. IoT tabanlı modern kilitler, Wi-Fi ve Bluetooth protokollerini kullanarak biyometrik doğrulama ve uzaktan denetlenebilirlik sunarken, elektrik kesintileri sırasında RFID tabanlı sistemlerde işlevsellik kaybı riski oluşmaktadır.

Bu teknik kısıtlar, enerji hasatlama yöntemleriyle uyumlu çalışabilen düşük akım tüketimli mikrodenetleyicilerin ve yüksek verimliliğe sahip minyatür aktüatörlerin entegrasyonunu zorunlu kılmıştır. Literatürdeki bu enerji verimliliği sorunlarına çözüm olarak geliştirilen yenilikçi tasarımda; 6V, 60 RPM'lik redüktör, 4 kg/cm tork ve 9,5 gram ağırlığa sahip bir Aslong motor ile NFC enerjisini doğrudan kullanan bir mekanizma tercih edilmiştir. Sistemde, NFC'den gelen enerji doğrudan motora iletilmekte ve motor bağlı bulunduğu volanı döndürerek dairesel hareketi Scotch Yoke mekanizması aracılığıyla doğrusal harekete dönüştürmektedir. Scotch Yoke mekanizmasının tercih edilme nedeni, dairesel hareketi saf sinüzoidal doğrusal harekete dönüştürerek hareketin uç noktalarında en yüksek lineer kuvvet kararlılığını sunması ve kısıtlı alanda pimin deliğe tam uyumla geçmesini sağlamasıdır. Kilitleme işlemi, motorun 180°'lik tekil hareketiyle pimin deliğe geçmesini sağlamakta ve bu dönme açısı; volana takılı olan mıknatısın motor şaftı etrafında yaptığı dairesel hareketin Hall Effect sensör tarafından algılanması ve buna bağlı olarak motorun durdurulmasıyla kontrol edilmektedir. Tasarlanan bu mekanizmada, motor milinin tahrikiyle ileri doğru itilen kilit pimi doğrudan karşılık yuvasına geçmektedir. Pimin kilit yuvası ile tam hizalanamadığı durumlarda ise, doğrusal itme hareketi esnasında üretilen mekanik enerji sistemdeki yay üzerinde potansiyel enerji olarak depolanmaktadır. Kullanıcı tarafından sistem manuel olarak döndürüldüğünde ve pim yuvayla aynı hizaya geldiği anda, yayda biriken bu enerji anında serbest kalarak pimin yuvaya güvenli bir şekilde oturmasını sağlar. Ardından devam eden manuel döndürme işlemi, anahtarın da dönmesini sağlayarak mekanik döngüyü tamamlar. Sistemin minimum bileşen sayısına sahip olması, sürtünme ve benzeri mekanik sebeplerden doğabilecek enerji kayıplarını en aza indirerek genel işletim verimliliğini artırmaktadır. Kilit açma işlemi ise kapı kolunun manuel olarak döndürülmesiyle tamamlanmaktadır.

2.1) Motor Çıkış Gücü ve Kinematik Değerler

Denklem 1 kullanılarak DC motorun Tork değeri 0.039228 Nm olarak hesaplanmıştır.

2.2) Scotch Yoke Mekanizması Kuvvet İletimi

Dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştüren scotch yoke mekanizmasında, sistemin eksantrikliği (e), toplam kilit pimi stroğunun (3 mm) yarısı olarak tasarlanmıştır (e = 1.5 mm = 0.00150 m). Bu durumda, kamın pime uyguladığı teorik lineer itme kuvveti (F) Denklem 4' de kullanılarak hesaplanır:

$$F = \frac{0.39228}{0.00150} = 261.52 \text{ N} \quad (8)$$

Mekanik sürtünme kayıpları dikkate alınarak sistem verimi %60 varsayıldığında, elde edilen net itme kuvveti 157 N olarak hesaplanmıştır.

2.3) Mekanik İş ve Yay Potansiyel Enerjisi

Kilit mekanizmasındaki geri dönüş yayının sıkıştırılması için gereken mekanik iş, Denklem 6 kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarımda 3 mm strok mesafesi, %50 sıkışması kabul edilerek, 1.5 ve 0.2 N/mm yay katsayısına sahip bir yay kullanılmıştır.

$$W_{teorik} = \frac{1}{2} \times 200 \times 0.0015^2 = 0.000225\ J \quad (9)$$

Sistemdeki ön sıkışmalar ve mekanik toleranslar göz önüne alındığında, operasyonel güvenliğin sağlanmak amacıyla (x1.5) tasarım değeri 0.8 mJ alınmıştır:

2.4) Toplam Elektriksel Enerji İhtiyacı

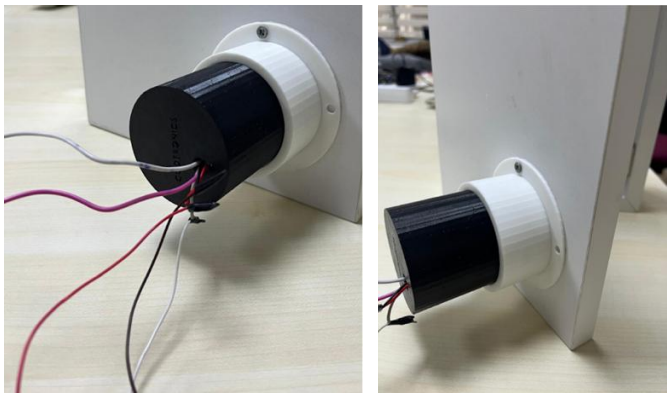
Mekanik sistemin ihtiyaç duyduğu 0.8 mJ'lik işin gerçekleştirilebilmesi için motora verilmesi gereken elektriksel enerji (E_{elek}), sistemin toplam verimine bağlıdır. Motor verimi (η_m=0.50), mekanik aktarım verimi (η_m=0.60) ve sürücü devre kayıpları (η_d=0.90) toplam sistem verimi (η_{toplam}) = 0.27 olarak belirlenmiş ve Denklem 7 kullanılarak toplam elektriksel enerji ihtiyacı hesaplanmıştır.

$$E_{elek} = \frac{0.0008}{0.27} = 0.0029 \text{ J} \quad (10)$$

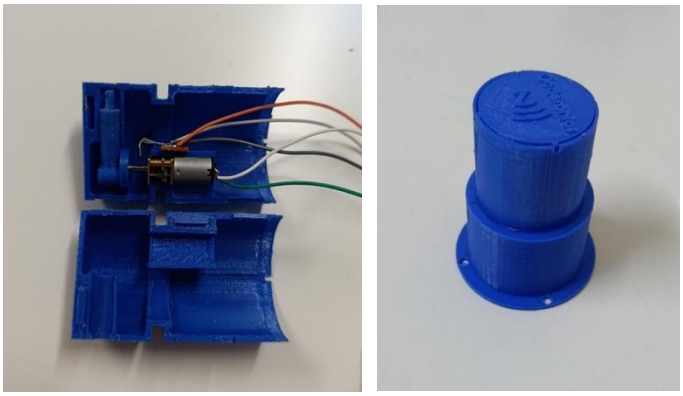
Sistemin her bir çevrim için yaklaşık 0.0029 J değerinde bir enerjiye ihtiyaç olacaktır.

C. Prototipleme

Kilit mekanizması tasarımlarının ilk prototipleri 3B katmanlı imalat teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Tasarım-1 (Şekil 3a) ve Tasarım-2 (Şekil 3b) için üretilen prototiplerin montaj ve entegrasyon çalışmaları yapılmıştır.



a)



b)

Şekil 3. Prototip üretimleri a) Tasarım-1, b) Tasarım -2

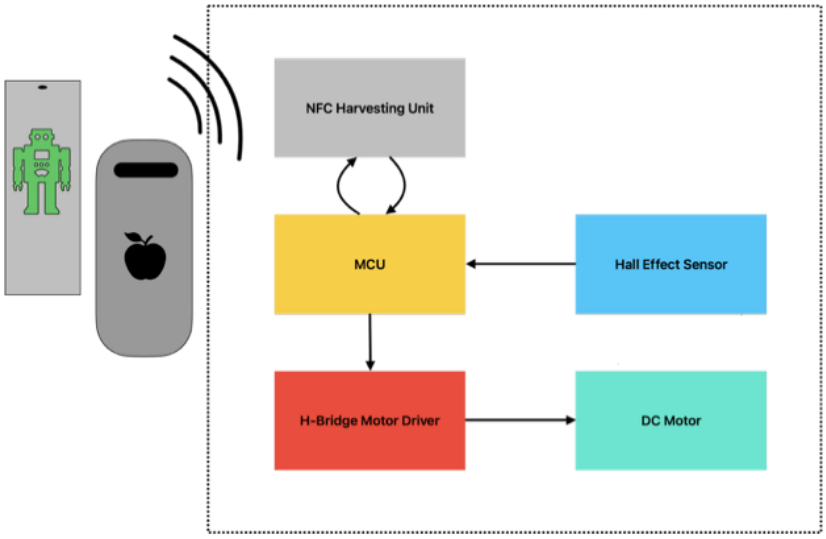
Ecokey kilit sistemi çalışma süreci 4 temel adımdan oluşmaktadır. İşlem sıralaması ve açıklamaları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Ecokey çalışma adımları

İşlem Sırası	**Açıklama**
	Sistem, kullanıcının mobil uygulamayı aktif hale getirerek akıllı telefonunu kilide yaklaştırmasıyla ile çalışmaya başlar. Bu aşamada telefonun NFC anteni, belirli bir frekansta (genellikle 13.56 MHz) elektromanyetik dalgalar yaymaya başlar.
	Ecokey kilit sistemi üzerinde bulunan pasif NFC modülü, telefondan gelen elektromanyetik dalgaları yakalar. Enerji hasadı (energy harvesting) devresi, bu radyo frekanslarını düşük voltajlı bir elektrik enerjisine dönüştürerek mikrodenetleyicinin (MCU) çalışması için gereken gücü sağlar.
	Mikrodenetleyici güç kazandıktan sonra, telefon ile kilit arasında güvenli bir veri tüneli kurulur. Bu aşamada dijital anahtar bilgileri, kriptografik erişim doğrulama yöntemleriyle kontrol edilir. Sadece yetkilendirilmiş cihazdan gelen veri paketi onaylanır; bu da sistemin dijital güvenliğini sağlar.
	Doğrulama başarıyla tamamlandığında, depolanan enerji mekanik motoru çalıştırmak için kullanılır. Motor, düşük güç tüketimli bir tork üreterek kilit mekanizmasını fiziksel olarak döndürür. Sonuç olarak, harici bir pile ihtiyaç duymadan kilit güvenli bir şekilde açılmış olur.

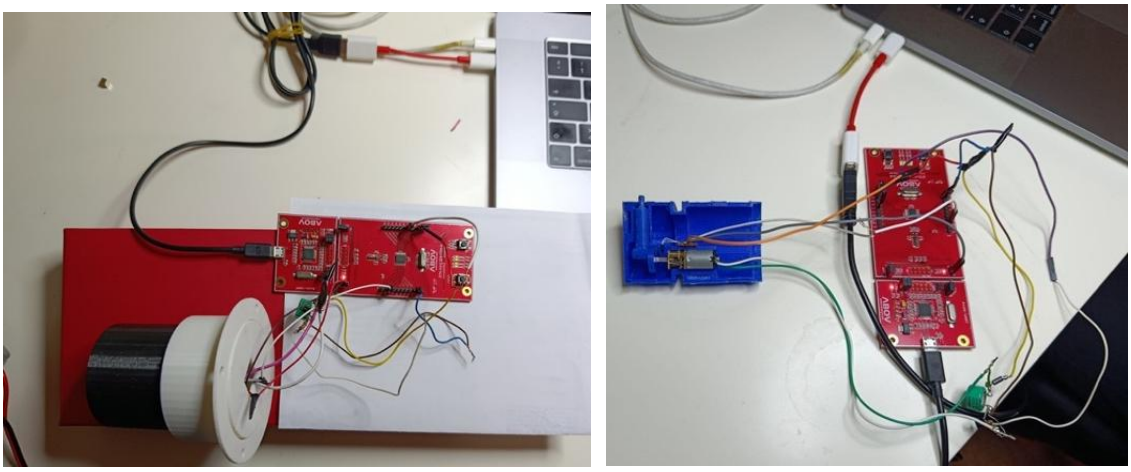
D. Elektronik Kontrol Sistemi

Ecokey sistemi, NFC sinyallerini hasatlayan kompakt bir mekanik ve elektronik yapıdan oluşmaktadır. Prototip tasarımın montajı sonrası mekanik ve elektronik testler ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4' de Ecokey kilit sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4. EcoKey Kilit Sistemi blok diyagramı

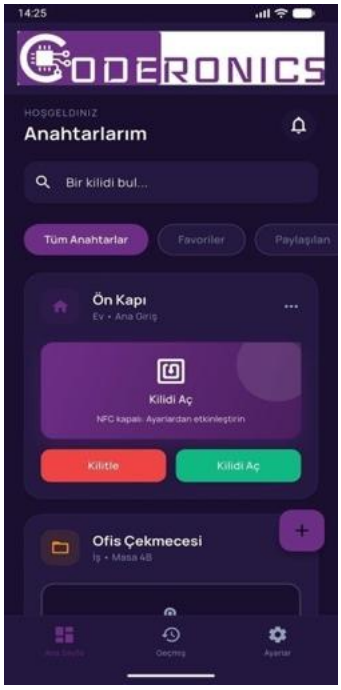
Geliştirme sürecinin önemli bir aşaması olan mekanik testlerden elde edilen veriler analiz edilerek EcoKey Kilit sistemi için geliştirilen mobil uygulamanın çalışma algoritmasıyla entegre edilmiş ve böylece Tasarım-1 ve Tasarım-2 için mekanik-yazılım uyumu (adaptasyon) sağlanmıştır (Şekil 5).



a) b)

Şekil 5. Mekanik-yazılım adaptasyonu a) Tasarım-1, b) Tasarım-2

Ecokey kilit sisteminin kontrolü ve yönetimi geliştirilen EcoKey Mobil uygulama üzerinden gerçekleştirilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Mobil uygulama yazılımı Kullanıcı Arayüzü

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, harici bir güç kaynağına (pil veya elektrik şebekesi) ihtiyaç duymayan, çalışma enerjisini doğrudan mobil cihazların yaydığı 13.56 MHz frekansındaki NFC sinyallerinden hasat eden yenilikçi ve sürdürülebilir EcoKey akıllı kilit sistemi başarıyla tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir. CAD tabanlı yazılımla modellenen ve açma-kapama mekanizmaları simüle edilen kilit sistemi için iki farklı mekanik tasarım geliştirilmiştir. Yapılan elektromekanik matematiksel modelleme ve test sonuçlarına göre sistemin performans parametreleri şu şekildedir:

Tasarım-1 (Kam Mekanizması): 2.25 mm'lik eksantriklik değeriyle motor milinin 180°'lik dönüşü neticesinde kilit pimi 4.5 mm'lik tam strok boyuna ulaşmaktadır. %70 mekanik aktarım verimi altında sistem 122 N net itme kuvveti üretmektedir. Geri dönüşü sağlamak amacıyla kullanılan paralel yayların eşdeğer rijitliği $k_{eş}$ = 870 Nm olarak belirlenmiş ve ön sıkışma kayıpları dahil edildiğinde pratik mekanik enerji ihtiyacı 0.011 J olarak hesaplanmıştır. Toplam sistem verimi kapsamında, Tasarım-1'in tek bir çalışma çevrimi için ihtiyaç duyduğu toplam elektriksel enerji 0.034 Joule olarak bulunmuştur.

Tasarım-2 (Scotch Yoke Mekanizması): Dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştüren bu tasarımda, 1.5 mm eksantriklik değeri ile pimin yuvaya tam uyumla geçmesi sağlanmıştır. %60 mekanik aktarım verimi varsayımıyla 157 N net itme kuvveti elde edilmiştir. 3 mm strok mesafesi ve 0.2 N/mm yay katsayısına sahip geri dönüş yayının sıkıştırılması için gereken operasyonel pratik iş 0.225 mJ olarak hesaplanmıştır. Sistem verimi, Tasarım-2'nin her bir çevrim için ihtiyaç duyduğu toplam elektriksel enerji 0.0029 J olarak hesaplanmıştır.

V. TARTIŞMA

Geleneksel silindirik pim-şifreli mekanik kilitlerin manipülatif açma yöntemlerine (bumping, picking, racking) karşı zayıf kalması ve anahtar kaybı gibi riskler barındırması akıllı kilitlere dönüşümün başlangıcıdır. Diğer taraftan, elektromekanik çözümlerden olan solenoid kilitlerin çalışmadıkları durumlarda bile sürekli enerji beslemesine bağımlı kalarak yüksek güç tüketimi (12V DC'de 1.2W) sergilemesi; modern IoT tabanlı kilitlerin (Wi-Fi, Bluetooth) ise pil ömrü, yüksek bakım gereksinimleri, çevresel sürdürülebilirlik sorunları ve elektrik kesintilerinde işlev kaybı riski taşıması kritik kısıtlar olarak öne çıkmaktadır.

Sürdürülebilir ve çevreci çözümlerin öne çıktığı günümüzde, bataryasız akıllı kilitler için enerji hasatlama optimizasyonu, düşük sürtünmeli ve düşük enerji tüketimli mekanik aktarımlar ön plana çıkmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen EcoKey sistemi, NFC sinyallerinden enerji hasat ederek pil bağımlılığını ortadan kaldırmakta ve enerji verimliliği sunmaktadır.

Geliştirilen iki tasarım mühendislik kriterleri açısından değerlendirildiğinde: Tasarım-1 (Kam mekanizması), kilit kapalıyken pime dışarıdan gelecek zorlama kuvvetini doğrudan motor milinin eksen merkezine ileten tersine sürülemez yapısıyla, düşük güçlü tüketimli bir motor kullanılmasına rağmen

manipülasyonlara karşı son derece yüksek bir fiziksel güvenlik avantajı; Tasarım-2 (Scotch Yoke mekanizması) ise minimum bileşen sayısı sayesinde sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını en aza indirmiş ve işletim verimliliğini artırmıştır.

Matematiksel modele göre; Tasarım-2'nin çevrim başına enerji ihtiyacı (0.0029 J), Tasarım-1'in ihtiyacına (0.034 J) göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca Tasarım-2'de kullanılan Hall Effect sensörlü ve mıknatıslı 180°'lik tekil hareket kontrolü, durma açısını hassaslaştırırken; pimin yuva ile hizalanamadığı durumlarda mekanik enerjiyi yay üzerinde depolayan ve kullanıcı kapı kolunu manuel döndürdüğü anda pimin yuvaya oturmasını sağlayan dinamik yapı, operasyonel güvenilirliği artırmaktadır.

VI. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında, enerji verimliliği yüksek, sürdürülebilir ve çevreci bir teknoloji olan NFC tabanlı EcoKey akıllı pilsiz kilit sisteminin tasarımı, elektromekanik modellemesi ve prototip üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem; yüksek maliyetli periyodik pil değiştirme ihtiyaçlarını ve bakım masraflarını ortadan kaldırılırken, atık pil oluşumunu da engelleyerek yeşil teknoloji standartlarına uygun, kesintisiz bir kullanım ömrü sunmaktadır.

Mekanik tasarım çalışmalarında; Tasarım-1 için 0.034 J, Tasarım-2 için ise 0.0029 J gibi oldukça düşük güç tüketim verilerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar; sistemin bireysel kullanımlardan hastane, otel ve eğitim kurumlarına, kurumsal binalardan endüstriyel panellere kadar pek çok alanda bakım gerektirmeyen, güvenilir ve güçlü bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

İleriye dönük çalışmalarda, mevcut düşük güç mekaniği ve enerji hasadı optimizasyon verileri temel alınarak, farklı endüstriyel sektörlerin gereksinimlerini karşılayacak yeni mekanik kilit tasarımlarının hayata geçirilmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1812-Yatırım Tabanlı Girişimcilik Destek Programı (BiGG Yatırım) tarafından 2250233 proje numarası ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] Y. W. Prakash, V. Biradar, S. Vincent, M. Martin and A. Jadhav, "Smart bluetooth low energy security system," 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 2017, pp. 2141-2146, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8300139.

[2] Hashim, K. A., Qasim, H. H., Hamzah, A. E., Hasan, O. A., & Al-Jadiri, M. (2023). Door lock system based on internet of things and Bluetooth by using Raspberry Pi. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12(5), 2753-2762.

[3] Erwan, A. N. M., Alfian, M. N. H. M., & Adenan, M. S. M. (2021). Smart door lock. International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS), 3(1), 1-15.

[4] Lazaro, A., Boada, M., Villarino, R., Girbau, D., & Pinho, P. (2019). NFC sensors based on energy harvesting for IoT applications. Recent Wireless Power Transfer Technologies, 23-43.

[5] Chang, B., Cheng, Y., Chen, B., Zhang, F., Zhu, W. T., Li, Y., & Wang, Z. (2018). User-friendly deniable storage for mobile devices. computers & security, 72, 163-174.

[6] Anonim. (2023, Aralık). Build battery-free smart locks with NFC energy harvesting technology (Sürüm 1.0) [Teknik rapor]. Infineon Technologies. https://www.infineon.com/gated/infineon-build-battery-free-smart-locks-with-nfc-energy-harvesting-technology_f08ba9d6-5484-48fa-b4e8-82b43848297b

[7] Hussain, S. M., Al Shukairi, S. A. H. S., Asuncion, R., and Prabhu, M., 2024, Smart security: An IoT-NFC lock system for efficient access management, Malaysian Journal of Science and Advanced Technology (MJSAT), 4(3), 322–329.

[8] Láng, M. L., Sabău, O. A., and Simon, K., 2024, Anatomy of a cloud-connected door lock prototype, integrating NFC-enabled mobile wallet Technologies, IEEE 22nd International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY).

[9] Nakandhrakumar, R. S., Aravinth, S., Ramkumar, V., Balachandar, K., Joshuva Arockia Dhanraj, and Dhamodharan, N., 2022, Design and development of IoT based smart door lock system, In 2022 Third International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT).

[10] Aniru, M. A., Osasenaga, E. V., Emmanuel, O. E., Gerald, M. O., and Melody, E. O., 2024, Design and construction of a smart lock system using Internet of Things (IoT), International Journal of Informatics, Information System and Computer Engineering, 6(1), 82–92.

[11] Zainuddin, A. A., Abd Rahman, A. D., Nor, R. M., Amir Hussin, A. A., Nik Mohd Kamal, N. M. S., Shamsudin, A. U., and Sapuan, M. S., 2024, Innovative IoT smart lock system: Enhancing security with fingerprint and RFID technology, Malaysian Journal of Science and Advanced Technology (MJSAT), 4(4), 360–365.

[12] Nivetha, N., 2024, Fingerprint and NFC base secure authentication for safe lock, International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), Advance online publication. E-ISSN 2582-2160.

[13] Pacheco, J., and Miranda, K., 2020, Design of a low-cost NFC door lock for a smart home system, In 2020 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XL) (pp. 1–6). IEEE.

[14] Sarangi, S., Dutta, S., Maurya, M., and Chatterjee, P. S., 2024, SLS: A novel RFID based smart locking system, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

İklim Değişikliğinin Turizm Sektörüne Etkilerinin AI ile Analizi

Begüm Acar[a], Ahmet Albayrak[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** begumacaar@gmail.com

ÖZET

İklim değişikliği, turizm sektörü üzerinde önemli çevresel ve ekonomik etkiler oluşturmaktadır. Özellikle sıcaklık, yağış, nem ve güneşlenme süresi gibi meteorolojik faktörler, turizm faaliyetlerinin zamansal ve mekânsal dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, iklim değişkenleri ile turizm gelirleri arasındaki ilişki yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırmada Muğla ili örneklem olarak seçilmiş, bölgeye ait meteorolojik veriler ile turizm gelirleri bütünleşik bir veri seti haline getirilmiştir. Analiz sürecinde veri ön işleme, özellik mühendisliği ve normalizasyon adımları uygulanmış; Ridge Regresyon ve Random Forest algoritmaları kullanılarak modeller geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, modellerin yüksek performans göstermesine rağmen turizm gelirlerinin büyük ölçüde zamansal eğilim tarafından açıklandığını ortaya koymuştur. İklim değişkenlerinin turizm gelirleri üzerindeki etkisinin ise sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bunun temel nedeninin, turizm gelir verilerinin enterpolasyon yöntemiyle oluşturulmasından kaynaklanan yapay zaman trendi olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak çalışma, makine öğrenmesi yöntemlerinin turizm talep analizinde önemli avantajlar sunduğunu, ancak güvenilir sonuçlar için yüksek kaliteli veri kullanımının gerekli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *İklim değişikliği, Turizm talebi, Makine öğrenmesi, Random Forest, Turizm iklim endeksi.*

AI-Based Analysis of the Impacts of Climate Change on the Tourism Sector

ABSTRACT

Climate change has significant environmental and economic impacts on the tourism sector. Meteorological variables such as temperature, precipitation, humidity, and sunshine duration directly affect the temporal and spatial distribution of tourism activities. In this study, the relationship between climate variables and tourism revenues was analyzed using artificial intelligence and machine learning methods. Muğla province was selected as the sample area, and regional meteorological data were integrated with tourism revenue data into a unified dataset. During the analysis process, data preprocessing, feature engineering, and normalization techniques were applied, and models were developed using Ridge Regression and Random Forest algorithms. The findings revealed that although the models achieved high performance, tourism revenues were largely explained by temporal trends. The effects of climate variables on tourism revenues remained limited. This situation is considered to result from the artificial time trend caused by the interpolation method used in generating tourism revenue data. Consequently, the study demonstrates that machine learning methods provide important advantages for tourism demand analysis; however, reliable results require the use of high-quality datasets. This research contributes to the literature by examining the relationship between climate change and tourism from a data-driven artificial intelligence perspective.

Keywords: *Climate change, Tourism demand, Machine learning, Random Forest, Tourism climate index.*

I. GİRİŞ

İklim değişikliği, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun olmaktan çıkmış; ekonomik sistemler, üretim süreçleri ve sektörel sürdürülebilirlik üzerinde belirleyici bir faktör haline gelmiştir. Küresel ölçekte gözlemlenen sıcaklık artışı, ekstrem hava olaylarının sıklığındaki yükseliş, yağış rejimlerinin değişimi ve

deniz seviyesindeki artış, doğal ve beşeri sistemler üzerinde çok yönlü etkiler yaratmaktadır. Bu etkiler, özellikle faaliyetlerini doğrudan iklim koşullarına dayandıran sektörlerde daha belirgin hale gelmektedir [5].

Turizm sektörü, küresel ekonomi içerisinde yüksek katma değer üreten ve birçok ülke için kritik döviz girdisi sağlayan bir alan olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte turizm faaliyetleri, büyük ölçüde çevresel koşullara bağımlı bir yapı sergilemektedir. Deniz turizmi, kış turizmi ve doğa temelli turizm türleri; sıcaklık, güneşlenme süresi, nem oranı ve yağış gibi meteorolojik değişkenlerden doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki etkilerinin incelenmesi, hem akademik araştırmalar hem de politika geliştirme süreçleri açısından stratejik bir öneme sahiptir [11].

İklim sisteminde meydana gelen değişimler, turizm faaliyetlerinin mekânsal ve zamansal dağılımını yeniden şekillendirmektedir. Bazı destinasyonlarda turizm sezonu uzarken, bazı bölgelerde aşırı sıcaklıklar, kuraklık veya çevresel bozulmalar nedeniyle turizm talebinde azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, turizm talebinin geleceğe yönelik tahmin edilmesini daha karmaşık hale getirmekte ve klasik istatistiksel yöntemlerin sınırlılıklarını ortaya çıkarmaktadır. Özellikle doğrusal varsayımlara dayanan geleneksel modeller, çok değişkenli ve dinamik yapıya sahip turizm sistemini açıklamada yetersiz kalabilmektedir.

Son yıllarda yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri, karmaşık veri yapılarının analizinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntemler, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilme yetenekleri sayesinde turizm talebinin modellenmesinde daha güçlü sonuçlar üretmektedir. Özellikle zaman serisi verilerinin analizinde kullanılan algoritmalar, geçmiş verilerden öğrenerek geleceğe yönelik daha tutarlı tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır [6].

Bu çalışma, iklim değişkenleri ile turizm gelirleri arasındaki ilişkiyi veri odaklı bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda Muğla ili örneklem olarak seçilmiş ve bölgeye ait uzun dönemli meteorolojik veriler ile turizm gelirleri birlikte analiz edilmiştir. Çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak iklim değişkenlerinin turizm gelirlerini açıklama gücü değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular güncel literatür çerçevesinde yorumlanmıştır.

Bu araştırmanın temel katkısı, turizm talebinin yalnızca betimleyici analizlerle değil, aynı zamanda yapay zeka temelli modelleme yaklaşımları ile değerlendirilmesidir. Bu sayede, turizm sektöründe karar vericilere veri temelli bir analiz çerçevesi sunulmakta ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

II. MATERYAL METOT

A. Araştırma Tasarımı

Bu çalışmada, iklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amacıyla veri odaklı ve yapay zeka temelli bir yaklaşım benimsenmiştir. Araştırma süreci; veri toplama, veri ön işleme, özellik mühendisliği, modelleme ve sonuçların değerlendirilmesi olmak üzere beş temel aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, Muğla ili örneklem olarak seçilmiş ve bölgeye ait meteorolojik veriler ile turizm gelirleri arasındaki ilişki makine öğrenmesi yöntemleri ile incelenmiştir. Analiz sürecinde Python programlama dili kullanılmış ve veri işleme ile modelleme süreçleri Pandas, NumPy ve Scikit-learn kütüphaneleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

B. Veri Seti ve Veri Kaynakları

Araştırmada kullanılan veri seti iki ana bileşenden oluşmaktadır:

- ❖ Meteorolojik Veriler

Meteorolojik veriler, Muğla iline ait uzun dönemli gözlemleri içermektedir. Veri setinde aşağıdaki değişkenler yer almaktadır:

- Ortalama sıcaklık (°C)
- Yağışlı gün sayısı
- Güneşlenme süresi
- Bulutlu gün sayısı
- Nispi nem (%)

Veriler aylık bazda derlenmiş olup analiz sürecinde yıllık göstergelere dönüştürülmüştür.

- ❖ Turizm Gelir Verisi

Turizm gelir verileri, uzun dönemli kesintisiz veri bulunamaması nedeniyle belirli referans yıllar kullanılarak oluşturulmuştur. Ara yıllara ait değerler doğrusal enterpolasyon yöntemi ile tahmin edilmiştir.

Bu yaklaşım veri sürekliliğini sağlamak açısından avantaj sunmakla birlikte, model sonuçlarının yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir kısıt olarak değerlendirilmiştir.

C. Veri Ön İşleme Süreci

Ham veriler üzerinde analiz yapılmadan önce çeşitli veri temizleme ve dönüştürme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Excel formatındaki veri setleri Python ortamına aktarılmış ve tüm değişkenler analiz için uygun formata dönüştürülmüştür. Veri setinde yer alan sütun isimleri standartlaştırılmış ve veri tipleri kontrol edilmiştir.

Meteorolojik veriler içerisinde yer alan sayısal olmayan değerler, analiz hatalarını önlemek amacıyla sayısal formata dönüştürülmüş ve hatalı değerler eksik veri olarak işaretlenmiştir.

Veri setinde yer alan ve yıllık ortalamayı temsil eden "13. ay" verileri, veri tekrarını önlemek amacıyla analiz dışı bırakılmıştır.

Güneşlenme verilerinde gözlemlenen gerçek dışı düşük değerler (eşik altı veriler) temizlenmiş ve bu değerler eksik veri olarak değerlendirilmiştir.

Eksik verilerin model üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla, veri setindeki boş değerler ilgili değişkenin ortalaması ile doldurulmuştur. Bu yöntem, veri kaybını önlemek ve model stabilitesini artırmak amacıyla tercih edilmiştir.

D. Özellik Mühendisliği ve Veri Dönüşümü

Turizm faaliyetlerinin yıl içerisindeki dağılımı incelendiğinde, özellikle yaz sezonunda yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle analiz yalnızca yaz aylarını kapsayacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Bu çalışmada yaz sezonu, Mayıs–Eylül (5–9. aylar) aralığı olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda yalnızca ilgili aylara ait veriler analizde kullanılmıştır.

Her yıl için aşağıdaki göstergeler hesaplanmıştır:

- Yaz dönemi ortalama sıcaklık
- Yaz dönemi ortalama yağışlı gün sayısı
- Yaz dönemi ortalama güneşlenme süresi
- Yaz dönemi ortalama bulutlu gün sayısı
- Yaz dönemi ortalama nem oranı

Bu değişkenler yıllık bazda gruplanarak tek bir veri setinde birleştirilmiştir.

Modelleme sürecinde değişkenler arası ölçek farklılıklarının etkisini azaltmak amacıyla turizm gelir verisi Min-Max normalizasyon yöntemi ile dönüştürülmüştür. Bu işlem sayesinde modelin daha dengeli öğrenmesi sağlanmıştır.

E. Modelleme Yaklaşımı

Bu çalışmada, iklim değişkenleri ile turizm gelirleri arasındaki ilişkinin modellenmesi amacıyla iki farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır.

❖ Ridge Regresyon Modeli

Ridge regresyon, doğrusal regresyon modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olup, modelde aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla düzenlileştirme (regularization) terimi içermektedir.

Bu modelde bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki doğrusal olarak ifade edilmekte, ancak model karmaşıklığı ceza terimi ile sınırlandırılmaktadır. Bu özellik, özellikle çoklu değişken içeren veri setlerinde modelin genellenebilirliğini artırmaktadır.

❖ Random Forest Regresyon Modeli

Random Forest algoritması, karar ağaçlarına dayalı topluluk öğrenme yöntemlerinden biridir. Model, birden fazla karar ağacının çıktısını birleştirerek daha güçlü ve stabil tahminler üretmektedir. Özellikle doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilme kapasitesi sayesinde iklim değişkenleri gibi karmaşık veri yapılarında başarılı sonuçlar verebilmektedir. Turizm talebi; iklimsel, ekonomik ve davranışsal faktörlerin birlikte etkilediği çok boyutlu bir yapı sergilediğinden, doğrusal varsayımlara dayanan geleneksel modeller bu karmaşıklığı açıklamada yetersiz kalabilmektedir. Random Forest algoritması ise değişkenler arasındaki örüntüleri daha esnek biçimde modelleyebilmesi ve aşırı öğrenmeye karşı daha dayanıklı yapısı nedeniyle bu çalışma kapsamında temel model olarak tercih edilmiştir.

F. Model Performans Değerlendirme Kriterleri

Modellerin performansı üç farklı metrik kullanılarak değerlendirilmiştir:

- Ortalama Mutlak Hata (MAE): Tahminlerin gerçek değerlere ortalama uzaklığını ölçer
- Kök Ortalama Kare Hata (RMSE): Büyük hatalara daha fazla ağırlık verir
- Belirleme Katsayısı (R^2): Modelin veri varyansını açıklama gücünü gösterir

Bu metrikler, model performansının çok boyutlu olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

G. *Değişken Önem Analizi*

Random Forest modeli kullanılarak değişkenlerin turizm geliri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz, modelin hangi değişkenlere daha fazla ağırlık verdiğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, özellikle zaman değişkeninin (yıl) model üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, turizm gelirlerinin yalnızca iklim değişkenlerinden değil, ekonomik ve yapısal faktörlerden de güçlü şekilde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

H. *Görselleştirme ve Analiz Süreci*

Analiz sürecinde elde edilen bulguların daha açık ve yorumlanabilir hale getirilmesi amacıyla çeşitli grafiksel görselleştirme tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu grafikler, model sonuçlarının değerlendirilmesi ve değişkenler arasındaki ilişkilerin ortaya konulması açısından önemli bir analitik araç olarak kullanılmıştır.

Bu kapsamda oluşturulan görseller bulgular bölümünde sunulmuş olup aşağıdaki analizleri içermektedir:

- Turizm gelirlerinin yıllara göre değişimini gösteren zaman serisi grafiği
- Yaz sıcaklığı ile turizm geliri arasındaki ilişkiyi gösteren saçılım grafiği
- Random Forest modeline ait gerçek ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması
- Modelde kullanılan değişkenlerin önem düzeylerini gösteren grafik

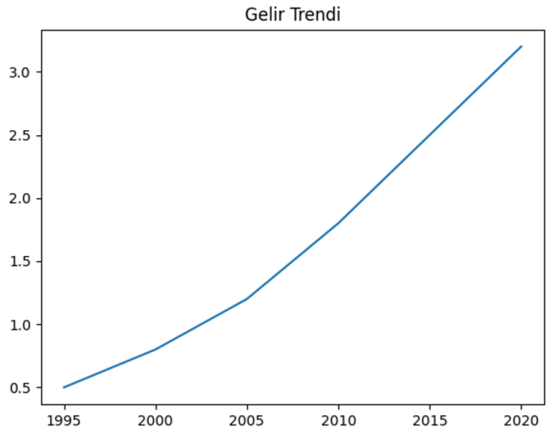
Bu görselleştirmeler, model çıktılarının yorumlanmasını kolaylaştırmakta ve analiz sonuçlarının daha bütüncül şekilde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. *Turizm Gelirlerinin Zaman İçindeki Değişimi*

Muğla iline ait turizm gelirleri incelendiğinde, 1995–2020 döneminde genel olarak artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Özellikle 2005 yılı sonrasında gelir serisinde daha belirgin bir yükseliş trendi oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu durum, Türkiye'nin turizm sektöründeki büyüme eğilimi, bölgesel destinasyon çeşitliliğinin artması ve uluslararası turist hareketliliğindeki genişleme ile ilişkilendirilebilir.

Şekil 1'de sunulan zaman serisi grafiği, turizm gelirlerindeki uzun dönemli değişimi görselleştirmekte ve veri setindeki eğilimin yıllar boyunca istikrarlı biçimde yükseldiğini göstermektedir.



Şekil. 1 Muğla İline Ait Turizm Gelirlerinin Yıllara Göre Değişimi

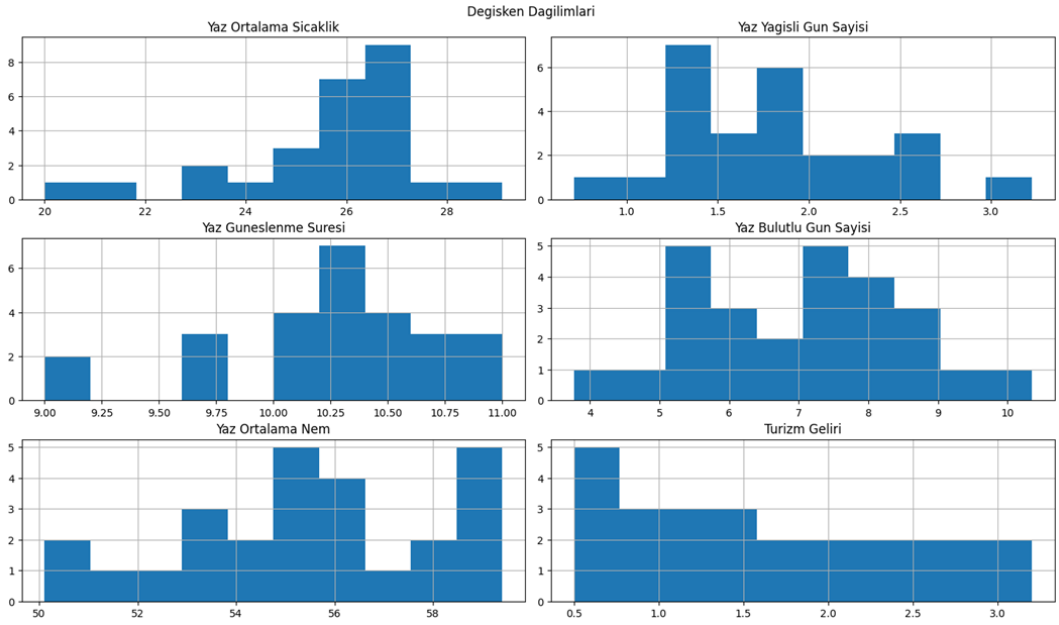
Bu artış eğilimi, küresel turizm sektöründeki büyüme trendi ile paralellik göstermektedir. [11] UNWTO verilerine göre, uluslararası turizm gelirleri son yıllarda sürekli artış göstermiş ve turizm, birçok ülke ekonomisi için temel gelir kaynaklarından biri haline gelmiştir.

Ancak dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, bu çalışmada kullanılan turizm gelir verisinin doğrudan gözlemsel veri olmayıp belirli yıllar arasındaki enterpolasyon yöntemi ile elde edilmiş olmasıdır. Bu nedenle elde edilen artış trendi, gerçek ekonomik büyümenin yanı sıra modelleme sürecinin bir sonucu olarak da değerlendirilmelidir.

Bu durum, ilerleyen bölümlerde elde edilen model performans sonuçlarının yorumlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

B. İklim Değişkenleri ile Turizm Geliri Arasındaki İlişki

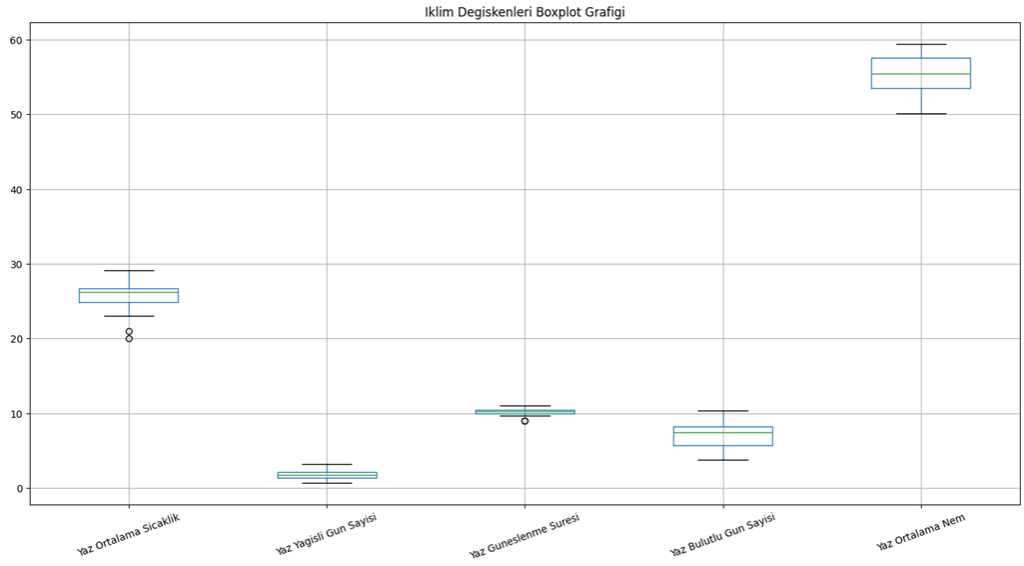
İklim değişkenlerinin dağılım özelliklerinin incelenmesi, modelleme sürecinden önce veri yapısının anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda oluşturulan histogram grafikleri, değişkenlerin hangi değer aralıklarında yoğunlaştığını ve veri setindeki genel dağılım yapısını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. İklim Değişkenleri ve Turizm Geliri Dağılımları

Histogramlar incelendiğinde, sıcaklık ve nem değişkenlerinin daha dar bir bantta yoğunlaştığı, buna karşılık yağışlı gün sayısı ve güneşlenme süresi değişkenlerinde daha geniş bir dağılım bulunduğu görülmektedir. Bu durum, meteorolojik değişkenlerin dönemsel dalgalanma düzeylerinin birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca veri dağılımlarında belirgin uç değerlerin sınırlı olması, veri temizleme ve ön işleme sürecinin başarılı şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

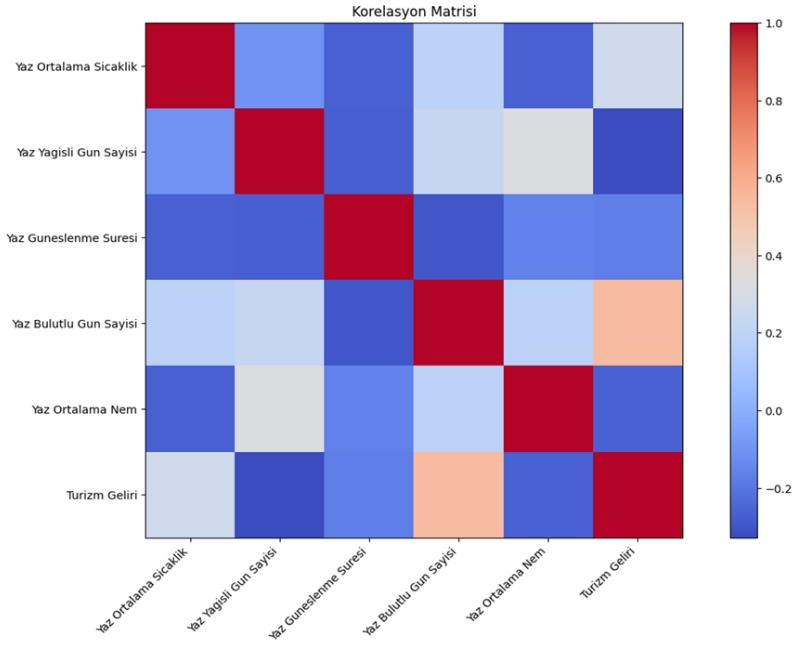
Veri setindeki değişkenlerin merkezi eğilim ve değişkenlik düzeylerini daha ayrıntılı incelemek amacıyla kutu grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 3. İklim Değişkenlerine Ait Kutu Grafikleri

Kutu grafikleri incelendiğinde, özellikle yağışlı gün sayısı değişkeninin diğer değişkenlere kıyasla daha yüksek oynaklık gösterdiği dikkat çekmektedir. Güneşlenme süresi ve sıcaklık değişkenlerinde ise daha dengeli bir dağılım yapısı gözlemlenmektedir. Çeyrekler arası aralıkların farklılaşması, iklim göstergelerinin yıl içerisindeki değişim seviyelerinin birbirinden farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu analiz, değişkenler arasında ölçek farklılıklarının bulunduğunu ve modelleme öncesinde normalizasyon işleminin gerekli olduğunu desteklemektedir.

İklim değişkenleri ile turizm geliri arasındaki doğrusal ilişkilerin incelenmesi amacıyla korelasyon matrisi oluşturulmuştur.

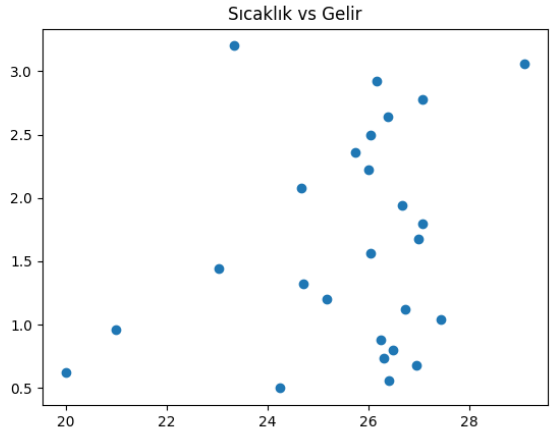


Şekil 4. İklim Değişkenleri ile Turizm Geliri Arasındaki Korelasyon Matrisi

Korelasyon analizi sonuçları, iklim değişkenleri ile turizm gelirleri arasında yüksek düzeyli doğrusal ilişkilerin oluşmadığını ortaya koymaktadır. Özellikle bulutlu gün sayısı değişkeninin diğer iklim göstergelerine kıyasla turizm gelirleriyle daha belirgin bir ilişki sergilediği görülmektedir. Buna karşın sıcaklık, nem ve güneşlenme süresi değişkenlerinin açıklayıcılık düzeyinin sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır.

Bu bulgu, turizm talebinin yalnızca meteorolojik faktörlerle açıklanamayacağını ortaya koyan güncel çalışmalarla paralellik göstermektedir. Nitekim [2] turizm talebinin ekonomik büyüme, ulaşım altyapısı, destinasyon imajı ve küresel hareketlilik gibi çok sayıda değişkenin ortak etkisi altında şekillendiğini belirtmektedir. Benzer şekilde [4], iklim değişikliğinin turizm üzerindeki etkisinin doğrusal olmayan ve bölgesel farklılıklar içeren karmaşık bir yapıya sahip olduğunu vurgulamaktadır.

İklim değişkenleri ile turizm gelirleri arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı incelenmesi amacıyla saçılım grafikleri oluşturulmuştur.



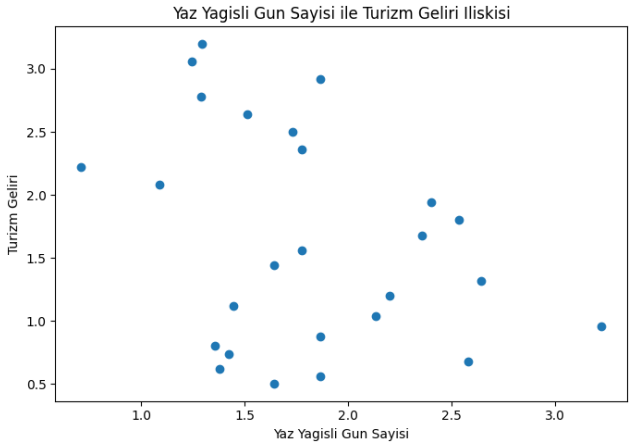
Şekil 5. Yaz Ortalama Sıcaklığı ile Turizm Geliri Arasındaki İlişki

Sıcaklık ile turizm gelirleri arasındaki dağılım yapısı, değişkenler arasında güçlü doğrusal bir ilişkinin oluşmadığını göstermektedir. Veri noktalarının geniş bir alana yayılması, sıcaklığın tek başına belirleyici bir unsur olmadığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte belirli sıcaklık aralıklarında gelir yoğunlaşmasının gözlemlenmesi, turizm faaliyetleri açısından optimum iklim koşullarının varlığına işaret etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, [1] Becken tarafından ortaya konulan ve aşırı sıcaklıkların turizm talebi üzerinde negatif etkiler oluşturabileceğini belirten çalışmalarla uyumludur. Özellikle Akdeniz destinasyonlarında

artan sıcaklıkların uzun vadede destinasyon tercihlerini değiştirebileceği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır.

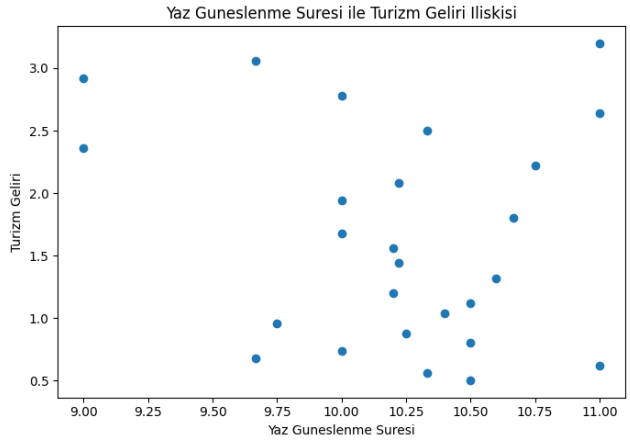
Turizm gelirleri ile yağışlı gün sayısı arasındaki ilişki de ayrıca incelenmiştir.



Şekil 6. Yağışlı Gün Sayısı ile Turizm Geliri Arasındaki İlişki

Grafik incelendiğinde yağışlı gün sayısındaki artışın turizm gelirleri üzerinde belirgin ve doğrusal bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Bununla birlikte düşük yağış seviyelerine sahip dönemlerde turizm gelirlerinin görece daha yüksek değerlere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, yaz turizminin iklim konforu ile ilişkili olduğunu desteklemektedir.

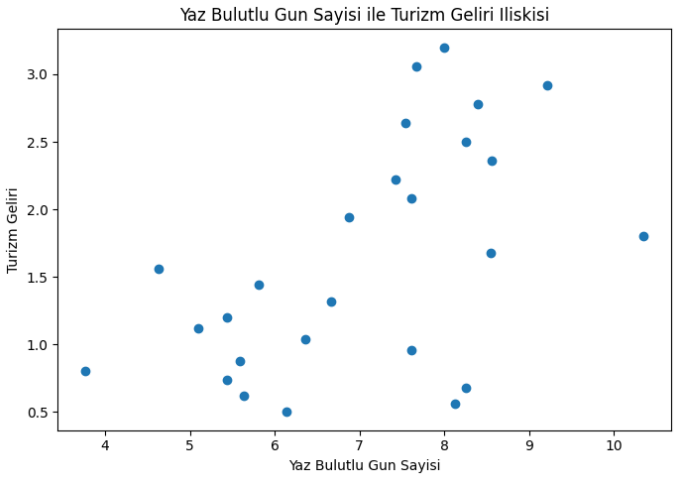
Güneşlenme süresi ile turizm gelirleri arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 7. Güneşlenme Süresi ile Turizm Geliri Arasındaki İlişki

Grafikte güneşlenme süresi arttıkça turizm gelirlerinde sınırlı düzeyde artış eğilimi gözlemlense de ilişkinin güçlü olmadığı görülmektedir. Bu durum, güneşlenme süresinin turizm açısından önemli bir unsur olmasına rağmen tek başına belirleyici bir değişken olmadığını göstermektedir.

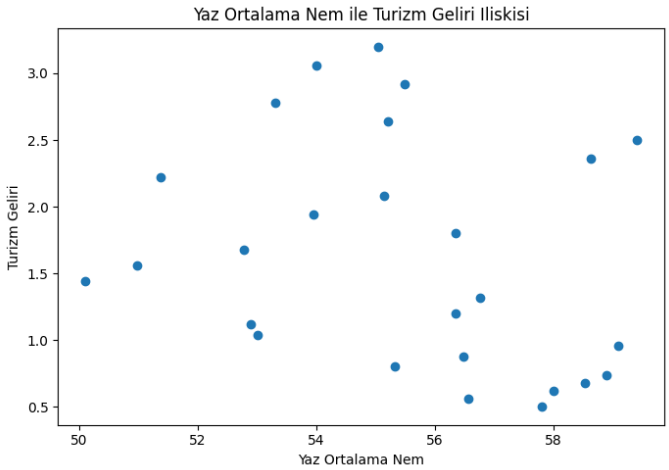
Bulutlu gün sayısı ile turizm gelirleri arasındaki ilişki aşağıda sunulmuştur.



Şekil 8. Bulutlu Gün Sayısı ile Turizm Geliri Arasındaki İlişki

Bulutlu gün sayısının diğer iklim değişkenlerine kıyasla turizm geliri ile daha belirgin ilişki gösterdiği görülmektedir. Bunun temel nedeni, bulutluluk düzeyinin doğrudan güneşlenme koşullarını ve algılanan iklim konforunu etkilemesidir. Ancak ilişkinin yine de yüksek doğrusal seviyede olmaması, turizm talebinin çok boyutlu yapısını desteklemektedir.

Nem oranı ile turizm gelirleri arasındaki ilişki de analiz edilmiştir.



Şekil 9. Ortalama nem oranı ile turizm geliri arasındaki ilişki

Nem oranı ile turizm geliri arasında belirgin bir doğrusal ilişki bulunmadığı görülmektedir. Özellikle yüksek nem seviyelerinin yaz turizmi açısından konfor düzeyini azaltabileceği düşünülse de veri seti içerisinde bu etkinin doğrudan ve güçlü biçimde gözlemlenmediği anlaşılmaktadır.

Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, iklim değişkenlerinin turizm gelirleri üzerinde tek başına belirleyici olmadığı görülmektedir. Bu sonuç, literatürde yer alan güncel çalışmalarla uyumlu olup turizm talebinin ekonomik koşullar, ulaşım imkanları, destinasyon algısı, döviz kurları ve küresel turizm hareketleri gibi çok sayıda faktörden etkilendiğini göstermektedir.

C. Model Performans Analizi

Çalışmada kullanılan Ridge regresyon ve Random Forest modellerinin performansları aşağıdaki tabloda sunulmaktadır:

Tablo 1: Model performans sonuçları

Model	**MAE**	**RMSE**	R^2
Ridge	0.025	0.030	0.99
Random Forest	0.012	0.018	0.996

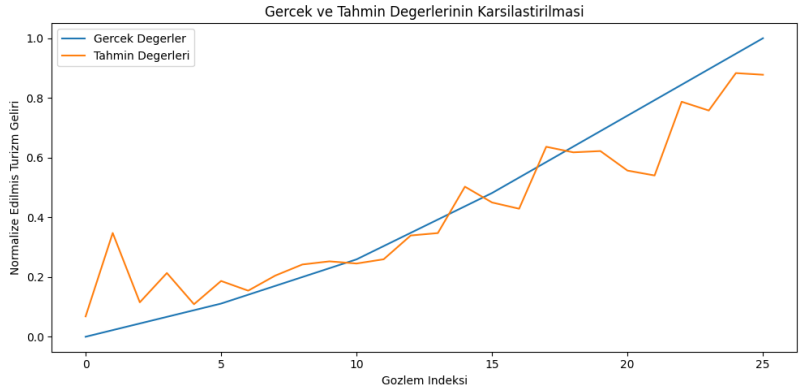
Model performans sonuçları, Random Forest algoritmasının Ridge regresyon modeline kıyasla daha başarılı tahminler ürettiğini göstermektedir. Özellikle düşük hata oranları ve yüksek R^2 değerleri, modelin veri setindeki örüntüleri etkin biçimde öğrendiğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte performans değerlerinin oldukça yüksek olması, sonuçların doğrudan güçlü nedensel ilişkiler şeklinde yorumlanmasını sınırlandırmaktadır. Turizm gelir verilerinin enterpolasyon yöntemiyle oluşturulmuş olması, zaman trendinin model tarafından baskın şekilde öğrenilmesine neden olmuş olabilir. Makine öğrenmesi literatüründe bu durum "spurious correlation" olarak tanımlanmakta ve özellikle zaman serisi çalışmalarında dikkat edilmesi gereken metodolojik bir problem olarak değerlendirilmektedir [9].

Benzer şekilde [8], büyük veri ve yapay zeka temelli turizm analizlerinde veri kalitesinin model güvenilirliği üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu vurgulamaktadır.

D. Model Tahmin Performansı

Model tarafından üretilen tahmin değerleri ile gerçek değerler karşılaştırıldığında, özellikle Random Forest algoritmasının veri setindeki genel eğilimi başarılı şekilde öğrendiği görülmektedir.



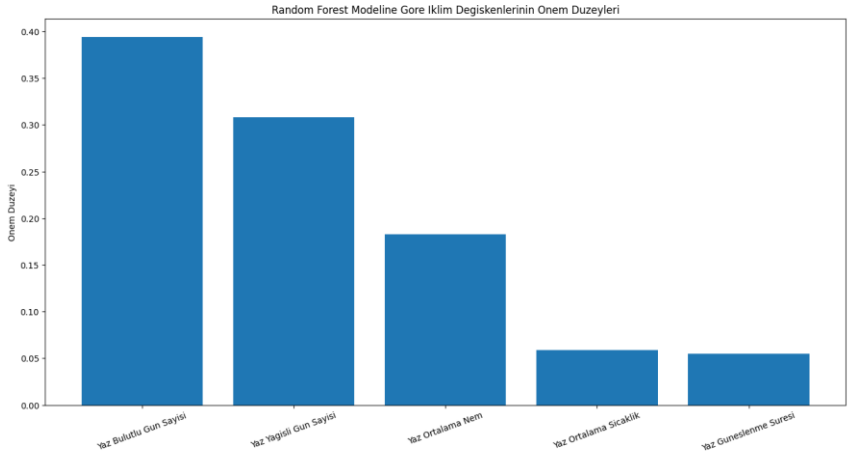
Şekil 10. Gerçek ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere oldukça yakın seyrettiği görülmektedir. Bu durum modelin veri içerisindeki örüntüleri başarılı şekilde öğrendiğini göstermektedir. Bununla birlikte bazı dönemlerde tahmin sapmalarının oluştuğu dikkat çekmektedir.

Söz konusu sapmalar, turizm gelirlerinin yalnızca iklim değişkenlerinden etkilenmediğini; ekonomik krizler, küresel turizm hareketleri, pandemi süreçleri, ulaşım maliyetleri ve destinasyon tercihleri gibi çok sayıda dışsal faktörden etkilendiğini göstermektedir.

E. Değişken Önem Analizi

Random Forest modeli kullanılarak gerçekleştirilen değişken önem analizi sonuçları aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 11. Değişken önem dağılımı

Grafik incelendiğinde bulutlu gün sayısı ve yağışlı gün sayısı değişkenlerinin model üzerinde daha yüksek ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık sıcaklık ve güneşlenme süresi değişkenlerinin model katkısının daha düşük seviyede kaldığı dikkat çekmektedir.

Bu sonuçlar, iklim değişkenlerinin turizm gelirlerini etkileyebildiğini ancak etkinin sınırlı düzeyde kaldığını göstermektedir. Ayrıca turizm talebinin çok faktörlü yapısı nedeniyle iklimsel değişkenlerin tek başına açıklayıcı unsur olmadığı anlaşılmaktadır.

Güncel çalışmalar da benzer şekilde, turizm talebinin çok faktörlü bir yapıya sahip olduğunu ve tek başına iklim değişkenleri ile açıklanamayacağını ortaya koymaktadır[2],[4].

Tablo 2. Değişken önem skorları

Değişken	Önem Skoru	Yüzde Etki
Bulutlu Gün Sayısı	0.394	39.387
Yağışlı Gün Sayısı	0.308	30.782
Ortalama Nem	0.183	18.334
Ortalama Sıcaklık	0.059	5.949
Güneşlenme Süresi	0.055	5.548

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, modelin iklim değişkenlerinden belirli ölçüde yararlandığı ancak turizm gelirlerini açıklamada daha geniş kapsamlı değişkenlere ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

F. Kritik Değerlendirme

Elde edilen bulgular, model performansının yüksek olmasına rağmen iklim değişkenlerinin turizm gelirini açıklama gücünün sınırlı olduğunu göstermektedir.

Bu durum, veri setinin yapısından kaynaklanan önemli bir metodolojik soruna işaret etmektedir. Gelir verisinin enterpolasyon yöntemi ile oluşturulmuş olması, modelin zaman trendini öğrenmesini kolaylaştırmış ve değişken önem dağılımını bozmuştur.

Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar doğrudan nedensel bir ilişkiyi temsil etmekten ziyade, veri yapısının model üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, iklim değişkenlerinin turizm üzerindeki etkisinin ancak daha kapsamlı ve gerçek veri setleri ile analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

G. Çalışmanın Kısıtları

Bu çalışmanın en önemli kısıtı, turizm gelir verisinin sınırlı veri noktalarından türetilmiş olmasıdır. Enterpolasyon yöntemi ile oluşturulan veri seti, modelin gerçek ilişkileri öğrenmesini zorlaştırmaktadır.

Bunun yanı sıra, analiz yalnızca Muğla ili ile sınırlandırılmış olup, elde edilen sonuçların genellenebilirliği sınırlıdır.

Ayrıca çalışmada kullanılan modeller, zaman serisi yapısını tam anlamıyla modelleyen derin öğrenme yaklaşımlarını içermemektedir. Bu durum, analiz sonuçlarının kapsamını sınırlayan bir diğer faktördür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iklim değişkenlerinin turizm sektörü üzerindeki etkileri Muğla ili örneğinde yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, turizm gelirlerinin zaman içerisinde artan bir eğilim gösterdiğini ortaya koymakla birlikte, bu artışın iklim değişkenleri tarafından güçlü bir şekilde açıklanamadığını göstermektedir. Özellikle değişken önem analizi sonuçları, modelin büyük ölçüde zaman değişkenine dayandığını ve iklim değişkenlerinin sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu durumun temel nedeni, çalışmada kullanılan turizm gelir verisinin enterpolasyon yöntemi ile oluşturulmuş olmasıdır. Bu yapı, modelin gerçek ilişkileri öğrenmesini zorlaştırmış ve zaman trendinin baskın hale gelmesine neden olmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma yüksek model performansına rağmen iklim değişkenlerinin turizm gelirlerini açıklama gücünün sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, turizm talebinin çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ve yalnızca iklim değişkenleri ile açıklanamayacağını ortaya koymaktadır.

Bu yönüyle çalışma, yapay zeka yöntemlerinin turizm analizinde uygulanabilirliğini göstermekte; ancak güvenilir ve anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için daha kapsamlı, doğrudan gözlemsel ve yüksek kaliteli veri setlerine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.

V. ÇIKARIM VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, iklim değişkenlerinin turizm gelirleri üzerinde etkili olduğunu ancak turizm talebinin yalnızca iklim verileri ile açıklanamayacağını göstermektedir. Model sonuçlarında zaman eğiliminin baskın hale gelmesi, kullanılan turizm gelir verisinin enterpolasyon yöntemi ile oluşturulmasından kaynaklanan önemli bir metodolojik sınırlılığa işaret etmektedir. Bu durum, turizm talep analizlerinde yüksek kaliteli ve doğrudan gözlemsel veri kullanımının önemini ortaya koymaktadır.

Çalışma sonuçları, makine öğrenmesi yöntemlerinin turizm talep tahmininde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Gelecek araştırmalarda ekonomik göstergeler, turist sayıları ve ulaşım maliyetleri gibi ek değişkenlerin modele dahil edilmesi; ayrıca derin öğrenme yöntemleri ve turizm odaklı iklim indekslerinin kullanılması önerilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, iklim değişikliği ve turizm ilişkisini yapay zeka temelli yöntemlerle inceleyerek literatüre veri odaklı bir katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Becken, S. (2019). Decarbonising tourism: Mission impossible? Tourism Recreation Research, 44(4), 419–433.

[2] Dogru, T., Bulut, U., & Kocak, E. (2019). The impact of tourism on economic growth: Evidence from panel data. Tourism Management, 75, 104–115.

[3] Figueira, C. (2019). Forecasting tourism demand: A review of econometric models. Tourism Economics, 25(3), 355–372.

[4] Gössling, S., & Scott, D. (2018). The decarbonisation impasse: Global tourism leaders' views on climate change mitigation. Journal of Sustainable Tourism, 26(12), 2071–2086.

[5] IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

[6] Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2020). Machine learning approaches in tourism demand forecasting. Journal of Tourism Futures, 6(2), 101–115.
[7] Law, R., Li, G., Fong, D. K. C., & Han, X. (2019). Tourism demand forecasting: A deep learning approach. Annals of Tourism Research, 75, 410–423.
[8] Li, J., Xu, L., Tang, L., Wang, S., & Li, L. (2020). Big data in tourism research: A literature review. Tourism Management, 68, 301–323.
[9] Molnar, C. (2020). Interpretable Machine Learning. Lulu Press.
[10] Song, H., Qiu, R. T. R., & Park, J. (2019). A review of research on tourism demand forecasting. Tourism Management, 75, 338–362.
[11] UNWTO. (2020). International Tourism Highlights. United Nations World Tourism Organization.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Elektropolisaj Sonrası Pasivasyon Parametrelerinin Yüzey Parlaklığı ve Korozyon Direnci Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Semra Cebesoy[a,b], Ahmet Alp[c]*

[a]Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya/Türkiye.
[b]Tırsan Treyler Sanayi ve Ticaret A.Ş., Sakarya/Türkiye.
[c] Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: semra.cebesoy1@ogr.sakarya.edu.tr

ÖZET

Elektropolisaj, metal yüzeylerdeki mikroskobik pürüzlerin kontrollü elektrokimyasal çözünme ile giderilmesini sağlayan ve yüzey düzgünlüğü, parlaklık ile korozyon direncini artıran bir yüzey işlem yöntemidir. Bu çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz çeliğe uygulanan elektropolisaj sonrasında gerçekleştirilen pasivasyon adımında sıcaklık ve süre parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler yağ alma ve asit temizleme işlemlerinden sonra sabit koşullarda elektropolisaja tabi tutulmuş, ardından 25°C, 35°C, 45°C, 55°C ve 65°C sıcaklıklarda 10, 20, 30 ve 40 dakika sürelerle pasivasyon uygulanmıştır. Yüzey performansı gloss ölçümleri, ASTM B117 tuz püskürtme testi ve SEM analizleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, pasivasyon sıcaklığı ve süresinin yüzey özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Uygun parametrelerde daha homojen pasif film oluşumu, artan yüzey parlaklığı ve iyileşmiş korozyon direnci elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *AISI 304 paslanmaz çelik, elektropolisaj, korozyon direnci, pasivasyon, yüzey morfolojisi*

Investigation of the Effects of Post-Electropolishing Passivation Parameters on Surface Brightness and Corrosion Resistance

ABSTRACT

Electropolishing is a surface treatment method that removes microscopic irregularities on metal surfaces through controlled electrochemical dissolution and enhances surface smoothness, brightness, and corrosion resistance. In this study, the effects of temperature and time parameters applied during the passivation step following electropolishing on the surface properties of AISI 304 stainless steel were investigated. After degreasing and acid cleaning processes, the samples were subjected to electropolishing under constant conditions, followed by passivation at temperatures of 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, and 65°C for durations of 10, 20, 30, and 40 minutes. Surface performance was evaluated by gloss measurements, ASTM B117 salt spray testing, and SEM analyses. The results showed that passivation temperature and duration played a decisive role in surface properties. Under appropriate parameters, a more homogeneous passive film formation was achieved, resulting in increased surface brightness and improved corrosion resistance.

Keywords: *AISI 304 stainless steel, corrosion resistance, electropolishing, passivation, surface morphology*

I. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler; yüksek korozyon direnci, mekanik dayanım ve işlenebilirlik özellikleri sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu malzemelerin korozyon direnci, yüzeylerinde oluşan krom açısından zengin pasif oksit tabakasından kaynaklanmaktadır [4]. Ancak yüzey kusurları ve deformasyonlar pasif tabakanın kararlılığını bozarak lokal korozyona neden olabilmektedir [5].

Yüzey performansını artırmak amacıyla kullanılan elektropolisaj işlemi, kontrollü anodik çözünme mekanizması ile daha düzgün, homojen ve parlak yüzeyler oluşturmaktadır [7]. Bu işlem yüzey kusurlarını azaltarak korozyon direncini artırmakta ve mekanik parlatma sonucu oluşabilecek deformasyonları önlemektedir [9].

Elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon işlemi ise yüzeyde krom açısından zengin koruyucu pasif film oluşumunu desteklemektedir [10]. Pasif filmin yapısı işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmekte; kısa süreli işlemler daha homojen yüzeyler sağlarken uzun süreli işlemler yüzey heterojenliğine neden olabilmektedir [12]. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ile parlaklık arasında ters orantılı bir ilişki bulunmakta olup, düzgün yüzeylerde daha yüksek parlaklık elde edilmektedir [13].

Bu çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz çelik üzerinde elektropolisaj sonrası farklı pasivasyon koşullarının yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

II. MATERYAL METOT

Elektropolisaj, paslanmaz çelik yüzeylerinde yüzey homojenliğini artırmak, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve korozyon direncini geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan etkili bir elektrokimyasal yüzey işlem yöntemidir [6]. Bu çalışmada elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon işleminin yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan çözeltilerin kimyasal bileşimleri ve işlem basamakları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Elektropolisaj işlem sırası

Adım	İşlem	Kimyasal bileşim	Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Akım yoğunluğu (A/dm^2)
1	Yağ alma	$NaOH + KOH + H_2O$	10	25	-
2	Asit temizleme	$HNO_3 + HF + H_2O$	15	25	-
3	Durulama	H_2O	2	25	-
4	Elektropolisaj	$H_3PO_4 + H_2SO_4 + H_2O$	15	45	8-9
5	Pasivasyon	Nitrik asit (HNO_3) + oksitleyici ajan	10-40	25-65	-
6	Durulama	H_2O	5	25	-

Deneysel prosedür ilk olarak yağ alma işlemi ile başlamıştır. Bu işlem sırasında numuneler alkali bazlı temizleme çözeltisine daldırılarak yüzeyde bulunan yağ, gres ve organik kirleticilerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Yağ alma işlemi sonrasında numuneler deiyonize su ile durulanmıştır. Ardından yüzey oksit tabakalarının ve işlem kalıntılarının giderilmesi amacıyla asit temizleme (pickling) işlemi uygulanmıştır. Pickling işlemi sırasında nitrik asit (HNO_3) ve hidroflorik asit (HF) içeren çözelti kullanılmıştır. Bu işlem ile yüzeydeki oksit filmleri çözündürülerek daha temiz ve homojen bir metal yüzey elde edilmiştir.

Ön yüzey hazırlama işlemlerinden sonra numunelere elektropolisaj işlemi uygulanmıştır. Elektropolisaj işlemi sırasında numune anot olarak bağlanmış ve fosforik asit ile sülfürik asit bazlı elektrolit çözeltisi içerisinde kontrollü anodik çözünme gerçekleştirilmiştir. Uygulanan elektrik akımı sayesinde yüzey üzerindeki mikro çıkıntılar seçici olarak çözünmüş ve daha düzgün bir yüzey morfolojisi elde edilmiştir. Elektropolisaj işleminin paslanmaz çelik yüzeylerinde mikro kusurları azaltarak daha parlak ve daha homojen yüzeyler oluşturduğu literatürde bildirilmektedir [7].

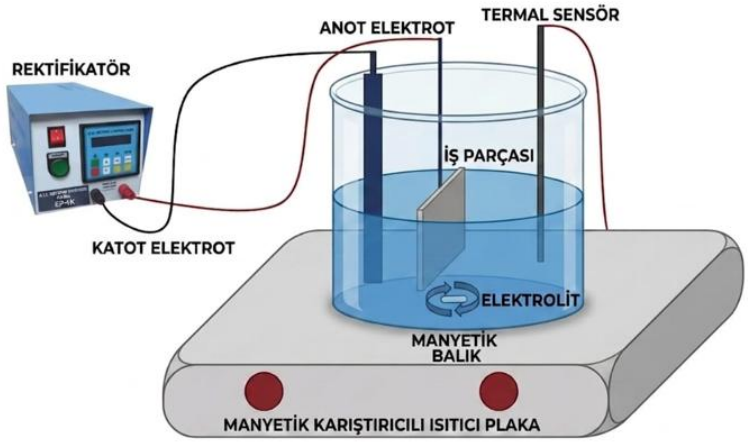
Elektropolisaj sonrasında numuneler pasivasyon işlemine tabi tutulmuştur. Pasivasyon işlemi sırasında nitrik asit bazlı çözelti kullanılmıştır. Bu işlem ile yüzeyde krom açısından zengin koruyucu pasif oksit tabakası oluşumu desteklenmiştir [4]. Pasivasyon işlemleri farklı sıcaklık ve süre kombinasyonlarında gerçekleştirilmiş ve yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada deney numunesi olarak AISI 304 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. AISI 304 paslanmaz çelik, yüksek korozyon direnci ve mekanik dayanımı nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir [2]. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (ağ. %)

Kalite	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
304 (1.4301)	0.007	2.00	0.045	0.015	1.00	17.5 – 19.5	8.0 – 10.5

Şekil 1'de elektropolisaj işlemi için kullanılan deneysel düzenek şematik olarak gösterilmiştir. Elektropolisaj hücresi, fosforik asit ve sülfürik asit bazlı elektrolit çözeltisi içeren cam beherden oluşmaktadır. Numune anot olarak bağlanırken karşı elektrot olarak paslanmaz çelik katot kullanılmıştır. Sisteme uygulanan doğru akım bir redresör yardımıyla sağlanmıştır. Elektrolit sıcaklığının kontrolü amacıyla sistem manyetik karıştırıcılı ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş ve sürekli karıştırma sağlanmıştır.



Şekil 1. EP sisteminin şematik düzeni, anodik iş parçasının ve paslanmaz çelik katodun fosforik-sülfürik asit elektroliti içindeki düzeni, DC güç kaynağı ve sıcaklık kontrollü manyetik karıştırma ünitesiyle birlikte gösterimi

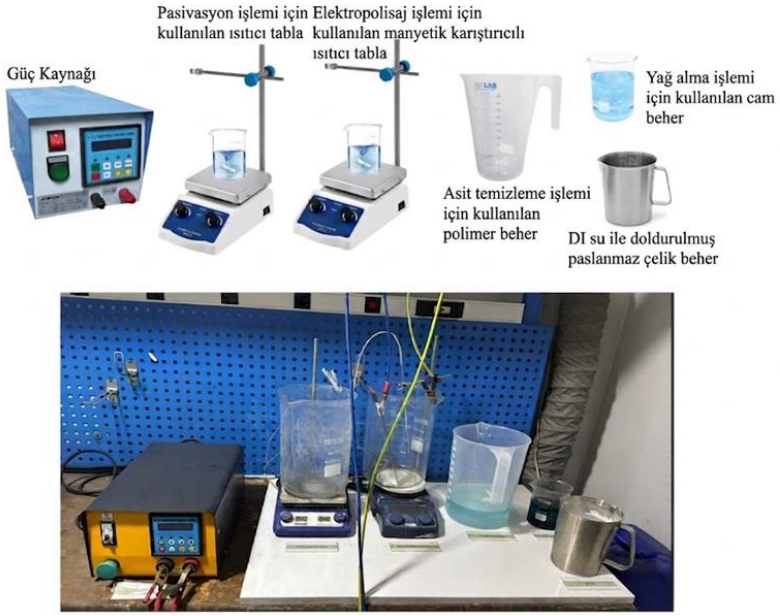
Bu çalışmada, elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon işleminin AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel süreçte tüm numuneler aynı ön yüzey hazırlama işlemlerine tabi tutulmuş, ardından farklı pasivasyon sıcaklığı ve sürelerinde işlem görmüştür. Elektropolisaj ve pasivasyon işlemleri sonrasında numunelerin yüzey parlaklığı, yüzey pürüzlülüğü, korozyon direnci, yüzey morfolojisi ve elementel bileşimleri değerlendirilmiştir.

Şekil 2'de elektropolisaj deneylerinde kullanılan laboratuvar düzeneği verilmiştir. Deneysel sistem; bir redresör, üç adet 5 L hacimli beher, bir adet 1 L hacimli beher ve deiyonize su kabından oluşmaktadır. Büyük hacimli beherler yağ alma, asit temizleme, elektropolisaj ve pasivasyon işlemlerinde kullanılmış, küçük hacimli beher ise gerektiğinde ek işlemler için değerlendirilmiştir. İşlem basamakları arasında numunelerin durulanması amacıyla deiyonize su kullanılmıştır.

Elektropolisaj işlemi, paslanmaz çelik yüzeyinde kontrollü anodik çözünme sağlayarak yüzey düzensizliklerini azaltmak ve daha homojen bir yüzey elde etmek amacıyla uygulanmıştır. Literatürde elektropolisaj işleminin yüzey pürüzlülüğünü azaltarak daha parlak ve korozyona karşı daha dirençli yüzeyler oluşturduğu bildirilmektedir [7]. Bu nedenle tüm numunelere aynı elektropolisaj koşulları uygulanmış ve yalnızca pasivasyon parametreleri değiştirilmiştir.

Pasivasyon işlemi, yüzeyde krom açısından zengin koruyucu pasif film oluşumunu desteklemek amacıyla gerçekleştirilmiştir [11]. Bu kapsamda pasivasyon sıcaklığı 25–65 °C arasında, işlem süresi ise 10–40 dakika arasında değiştirilmiştir. Farklı işlem koşullarının yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla toplam 23 adet numune hazırlanmıştır.

Deneysel prosedür sırasıyla yağ alma, asit temizleme, durulama, elektropolisaj, pasivasyon ve son durulama işlemlerinden oluşmaktadır. Numunelere ilk olarak 25 °C'de 10 dakika yağ alma işlemi uygulanmış, ardından 25 °C'de 15 dakika süreyle asit temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Durulama işlemi sonrasında numunelere 45 °C'de 15 dakika süreyle elektropolisaj uygulanmıştır. Elektropolisaj sonrası numuneler belirlenen sıcaklık ve süre kombinasyonlarında pasivasyon işlemine tabi tutulmuş ve son olarak deiyonize su ile durulanarak karakterizasyon analizleri için hazırlanmıştır.



Şekil 2. Deneysel elektropolisaj laboratuvarı

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon işleminin sıcaklık parametresinin AISI 304 paslanmaz çeliğin yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, pasivasyon sıcaklığının yüzey parlaklığı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve pasif film yapısı üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Elektropolisaj işlemi sonrasında yüzey homojenliğinin önemli ölçüde arttığı ve daha düzgün yüzey morfolojisi elde edildiği belirlenmiştir. Pasivasyon işlemleri sonrasında ise düşük sıcaklıklarda daha homojen ve kompakt pasif film yapısı oluştuğu görülmüştür. Özellikle 25 °C'de gerçekleştirilen 10 dakikalık pasivasyon işleminde en yüksek parlaklık ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Şekil 3'te tüm sıcaklıklarda optimum parlaklık ve pürüzlülük değerleri elde edilen numune görselleri verilmiştir.



Şekil 3. Tüm sıcaklıklarda optimum parlaklık ve pürüzlülük değerleri elde edilen numune görselleri (25, 35, 45 ve 55 °C – 10 dakika)

Pasivasyon sıcaklığının artmasıyla birlikte yüzey parlaklığında azalma ve yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4. Sıcaklık süresi yüksek olması nedeniyle yüzey bozulması ve parlaklık düşüşü görülen numuneler verilmiştir.



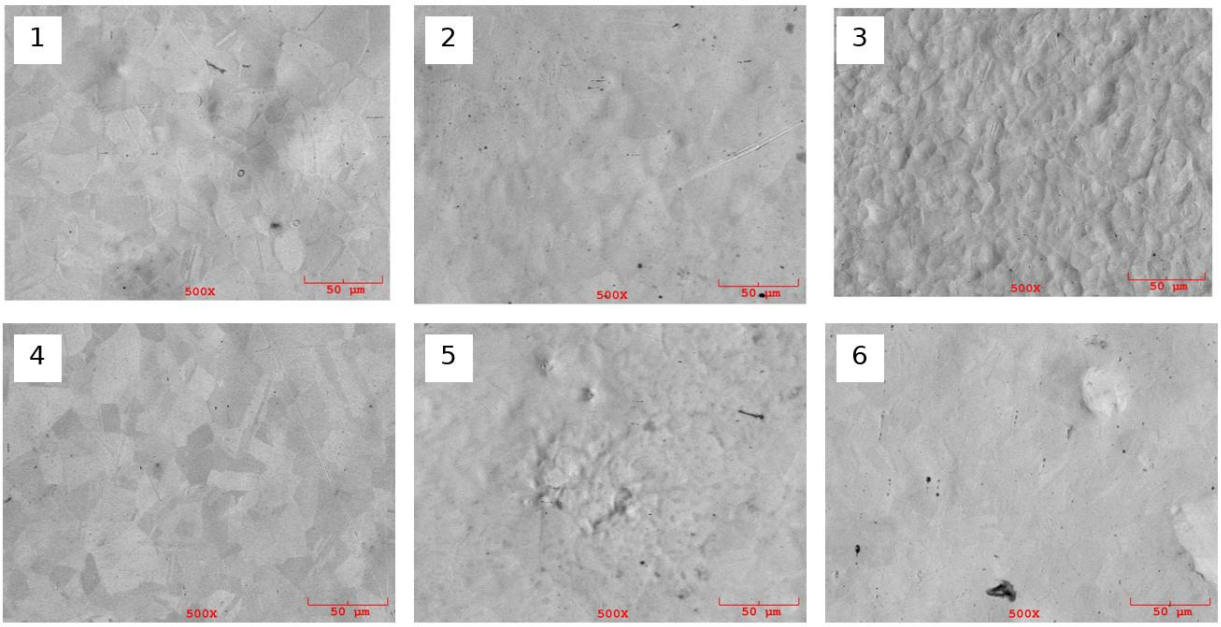
Şekil 4. Sıcaklık süresi yüksek olması nedeniyle yüzey bozulması ve parlaklık düşüşü görülen numuneler

Elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon işlemlerinin yüzey özellikleri üzerindeki etkileri Tablo 3'te verilmiştir. Özellikle 55 °C ve 65 °C sıcaklıklarda yüzey stabilitesinin azaldığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Pasivasyon parametrelerine bağlı yüzey özellikleri

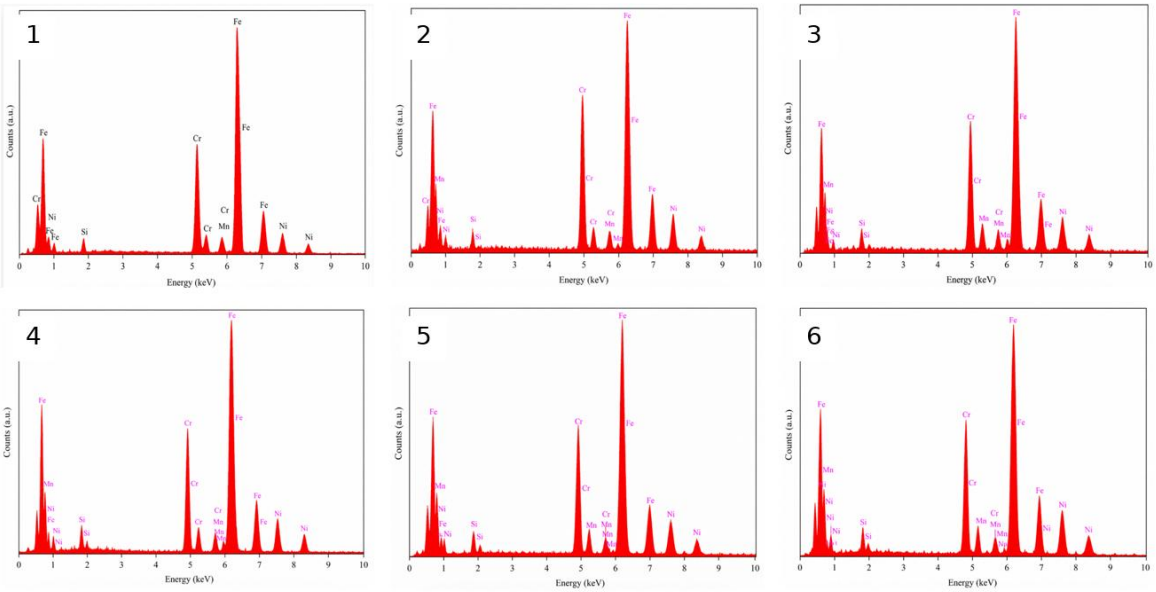
Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Parlaklık (GU)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Korozyon Testi (1000 sa)
25	10	172	0,489	OK
	20	168	0,535	OK
	30	155	0,687	OK
	40	153	0,710	OK
35	10	170	0,512	OK
	20	165	0,570	K
	30	164	0,582	K
	40	162	0,605	OK
45	10	168	0,535	OK
	20	167	0,547	OK
	30	165	0,570	OK
	40	160	0,628	OK
55	10	165	0,570	OK
	20	161	0,617	OK
	30	155	0,687	OK
	40	151	0,733	OK
65	10	105	1,267	OK
	20	102	1,302	K
	30	98	1,349	OK
	40	88	1,465	K

SEM analizlerinde düşük sıcaklıklarda daha düzgün yüzey yapıları gözlenirken, yüksek sıcaklıklarda mikro çukurcuklar, lokal çözünme bölgeleri ve heterojen oksit oluşumlarının belirgin hale geldiği görülmüştür. Şekil 4'te sadece pasivasyon işlemi uygulanmış ve farklı sıcaklıklardaki 10 dakikalık pasivasyon işlemi görmüş numunelerin SEM görselleri verilmiştir.



Şekil 4. Sadece pasivasyon işlemi uygulanmış ve farklı sıcaklıklarda 10 dakika süreyle pasivasyon işlemine tabi tutulmuş numunelerin SEM görüntüleri: (1) sadece pasivasyon uygulanmış numune, (2) 25 °C – 10 dk, (3) 35 °C – 10 dk, (4) 45 °C – 10 dk, (5) 55 °C – 10 dk ve (6) 65 °C – 10 dk pasivasyon uygulanmış numuneler.

Şekil 4'te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, sadece pasivasyon uygulanmış numuneden başlayarak sıcaklık artışına bağlı olarak yüzey morfolojisinde belirgin değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Sadece pasivasyon uygulanmış numunede yüzeyin genel olarak homojen karakter sergilediği, ancak yer yer yüzey düzensizlikleri ve mekanik işlem izlerinin bulunduğu dikkat çekmektedir. 25 °C'de 10 dakika süreyle pasivasyon uygulanan numunede yüzeyin daha düzgün, kompakt ve homojen bir yapıya sahip olduğu, mikro düzensizliklerin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. 35 °C'de gerçekleştirilen pasivasyon işleminde yüzey bütünlüğünün büyük ölçüde korunduğu ancak yüzey üzerinde hafif morfolojik dalgalanmaların oluşmaya başladığı belirlenmiştir. 45 °C'de ise yüzey üzerinde sınırlı sayıda mikro boşluk ve lokal düzensizlikler gözlenmesine rağmen genel yüzey yapısının halen stabil karakter sergilediği değerlendirilmiştir. 55 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinde yüzey morfolojisindeki bozulmaların daha belirgin hale geldiği, yüzey üzerinde heterojen bölgelerin ve lokal çukurcuk oluşumlarının arttığı görülmüştür. 65 °C'de gerçekleştirilen pasivasyon işleminde ise yüksek sıcaklığın etkisiyle yüzeyde belirgin mikro düzensizlikler, lokal çözünme bölgeleri ve heterojen oksit oluşumlarının meydana geldiği belirlenmiştir. Genel olarak sıcaklık artışıyla birlikte pasif film oluşum kinetiğinin hızlandığı, buna bağlı olarak yüzey homojenliğinin azaldığı ve yüzey morfolojisinin daha düzensiz hale geldiği değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Sadece pasivasyon işlemi uygulanmış ve farklı sıcaklıklarda 10 dakika süreyle pasivasyon işlemine tabi tutulmuş numunelere ait EDS spektrumları: (1) sadece pasivasyon uygulanmış numune, (2) 25 °C – 10 dk, (3) 35 °C – 10 dk, (4) 45 °C – 10 dk, (5) 55 °C – 10 dk ve (6) 65 °C – 10 dk pasivasyon uygulanmış numuneler.

EDS analizleri tüm numunelerde Fe, Cr, Ni ve O elementlerinin baskın olduğunu göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda daha homojen element dağılımı ve krom açısından zengin pasif film oluşumu gözlenirken, yüksek sıcaklıklarda element dağılımındaki heterojenliğin arttığı belirlenmiştir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde tüm numunelerde krom oranının yaklaşık %17–19 atomik yüzde aralığında değiştiği belirlenmiştir. Sadece elektropolisaj uygulanmış numunede krom oranı yaklaşık %17,072 olarak ölçülürken, pasivasyon işlemi uygulanan numunelerde bu değerin arttığı görülmüştür. Özellikle 25 °C, 35 °C ve 45 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinde krom oranı yaklaşık %18 seviyelerinde korunmuştur.

Korozyon test sonuçları düşük ve orta sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinin genel olarak başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Gözlenen lokal korozyon oluşumlarının ise büyük ölçüde numune kesim işlemleri sırasında oluşan yüzey çizikleri ve deformasyon bölgeleri ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen kısa süreli pasivasyon işlemlerinin daha başarılı yüzey performansı sağladığı belirlenmiştir. Özellikle 25 °C'de gerçekleştirilen 10 dakikalık pasivasyon işlemi, yüzey homojenliği, parlaklık, düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüzey stabilitesi açısından çalışmadaki en başarılı sonuçları vermiştir.

IV. TARTIŞMA

304 paslanmaz çelik yüzey özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yalnızca yüzey parlaklığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından değil, aynı zamanda yüzey morfolojisi, pasif film kararlılığı ve korozyon davranışı açısından da önemli farklılıklar ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda pasivasyon sıcaklığının yüzey performansı üzerinde doğrudan belirleyici olduğu görülmüştür.

Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinin daha homojen ve kararlı pasif film oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. Özellikle 25 °C'de gerçekleştirilen işlemlerde elde edilen düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek parlaklık değerleri, SEM görüntülerinde gözlenen düzgün yüzey morfolojisi ile doğrudan uyum göstermiştir. Literatürde elektropolisaj sonrası oluşan düzgün yüzey yapısının kontrollü pasif film oluşumu ile desteklenmesi durumunda yüzey performansının önemli ölçüde arttığı bildirilmektedir [8]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar söz konusu çalışmalar ile uyum göstermektedir.

Sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzey morfolojisinde belirgin değişimler meydana geldiği görülmüştür. Özellikle 55 °C ve 65 °C sıcaklıklarda yüzey üzerinde mikro çukurcuklar, granüler oksit kümeleri ve lokal çözünme bölgeleri oluşmuştur. SEM analizlerinde gözlenen bu morfolojik değişimler, yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki artış ve parlaklık değerlerindeki düşüş ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Lochynski ve arkadaşları [13], yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinde pasif film büyüme kinetiğinin hızlandığını ve buna bağlı olarak yüzey heterojenliğinin artabileceğini bildirmiştir. Bu çalışmada

elde edilen sonuçlar da yüksek sıcaklık koşullarında oksit büyümesinin daha düzensiz hale geldiğini göstermektedir.

EDS analizleri, sıcaklık değişiminin yalnızca yüzey morfolojisini değil aynı zamanda pasif film yapısının kimyasal karakterini de etkilediğini ortaya koymuştur. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemlerde krom açısından daha homojen ve stabil yüzey yapısı oluştuğu belirlenmiştir. Buna karşılık yüksek sıcaklıklarda element dağılımındaki heterojenlik artmış ve özellikle lokal çözünme bölgelerinde Fe açısından zengin alanların oluştuğu değerlendirilmiştir. Marcus [4], pasif film sürekliliğindeki lokal bozulmaların yüzey stabilitesini azalttığını ve lokal korozyon mekanizmalarını hızlandırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada elde edilen SEM ve EDS sonuçları söz konusu teori ile uyumludur.

Korozyon test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde düşük ve orta sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinin daha başarılı yüzey performansı sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte bazı numunelerde lokal korozyon oluşumları gözlenmiştir. Ancak SEM görüntüleri ve yüzey incelemeleri birlikte değerlendirildiğinde bu oluşumların büyük ölçüde numune kesim işlemleri sırasında meydana gelen yüzey çizikleri ve deformasyon bölgeleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum, yüzey işlem performansının yalnızca pasivasyon parametrelerine değil aynı zamanda numune hazırlama kalitesine de bağlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın genel sonuçları değerlendirildiğinde elektropolisaj sonrası uygulanan kontrollü pasivasyon işlemlerinin yüzey performansını önemli ölçüde geliştirdiği belirlenmiştir. Özellikle düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen kısa süreli pasivasyon işlemleri sayesinde daha homojen, kompakt ve kararlı pasif film oluşumu sağlanmıştır. Buna karşılık yüksek sıcaklıklarda pasif film büyümesinin kontrolsüz hale geldiği ve yüzey heterojenliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü artırmış, parlaklık değerlerini düşürmüş ve yüzey stabilitesini olumsuz etkilemiştir.

Bu çalışma yalnızca deneysel sonuçların ortaya konulması açısından değil, aynı zamanda pasivasyon sıcaklığının pasif film oluşum mekanizması üzerindeki etkisinin anlaşılması açısından da önemli katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, paslanmaz çelik yüzey işlemlerinde optimum pasivasyon parametrelerinin belirlenmesine yönelik bilimsel altyapı sunmakta ve özellikle otomotiv, medikal, gıda ve kimya endüstrilerindeki yüzey mühendisliği uygulamaları açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma sonucunda elektropolisaj sonrası uygulanan pasivasyon sıcaklığının AISI 304 paslanmaz çeliğin yüzey karakteristikleri üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen pasivasyon işlemlerinin daha homojen ve stabil pasif film oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. Özellikle 25 °C'de gerçekleştirilen 10 dakikalık pasivasyon işlemi, yüzey parlaklığı, düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüzey homojenliği açısından en başarılı sonuçları vermiştir.

SEM ve EDS analizleri birlikte değerlendirildiğinde sıcaklık artışına bağlı olarak yüzeyde heterojen oksit oluşumlarının arttığı, mikro çukurcuk ve lokal çözünme bölgelerinin oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen kontrolsüz oksit büyümesinin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı ve yüzey parlaklığını olumsuz etkilediği görülmüştür. Özellikle 55 °C ve 65 °C sıcaklıklarda yüzey stabilitesinin belirgin şekilde azaldığı değerlendirilmiştir.

Korozyon test sonuçları incelendiğinde pasif film sürekliliğinin yüzey performansı açısından kritik öneme sahip olduğu görülmüştür. Gözlenen lokal korozyon oluşumlarının büyük ölçüde numune kesim işlemleri sırasında oluşan yüzey çizikleri ve deformasyon bölgeleri ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Bu durum numune hazırlama aşamasının yüzey işlem performansı üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

Çalışma sonucunda elektropolisaj sonrası kontrollü pasivasyon işlemlerinin paslanmaz çelik yüzey performansını önemli ölçüde geliştirdiği belirlenmiştir. Elde edilen bulguların paslanmaz çeliklerin otomotiv, medikal, gıda ve kimya endüstrilerindeki yüzey işlem uygulamalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma, pasivasyon parametrelerinin optimize edilmesine yönelik gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde sağladıkları teknik destek, laboratuvar altyapısı ve katkılarından dolayı Tırsan Treyler Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca laboratuvar altyapısı, akademik destek ve analiz olanakları için Sakarya Üniversitesi'ne katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] J. R. Davis, "Stainless Steels," ASM International, 2000.
[2] A. J. Sedriks, "Corrosion of Stainless Steels," Wiley, 1996.
[3] C. C. Shih, C. M. Shih, Y. Y. Su, L. H. J. Su, M. S. J. Chang, and S. J. Lin, "Corrosion resistance of stainless steels," Corrosion Science, 46(2), 427–441, 2004.

[4] P. Marcus, “Corrosion Mechanisms in Theory and Practice,” CRC Press, 2002.
[5] E. Bardal, “Corrosion and Protection,” Springer, 2004.
[6] D. Landolt, “Fundamental aspects of electropolishing,” Electrochimica Acta, 32(1), 1–11, 1987.
[7] M. Datta and D. Landolt, “Fundamental aspects and applications of electropolishing,” Electrochimica Acta, 45(15–16), 2535–2558, 2000.
[8] T. Hryniewicz, “Electropolishing and passive film formation,” Surface Engineering, 10(2), 123–129, 1994.
[9] D. Colombo, M. Ricci, and A. Pola, “Surface finishing of stainless steels,” Journal of Materials Engineering and Performance, 33(4), 2154–2165, 2024.
[10] H. Hocheng, C.K. Chen, and M.H. Lin, “Surface treatment of stainless steels,” Journal of Materials Processing Technology, 111(1–3), 40–47, 2001.
[11] P. Lowery and J. Roll, “Passivation of stainless steels,” Micro Journal, 61(4), 35–39, 1998.
[12] Y. Ji, H. Wang, and X. Liu, “Corrosion resistance improvement after passivation,” Materials Science Forum, 1085, 215–221, 2023.
[13] P. Lochynski, T. Hryniewicz, and K. Rokosz, “Effect of passivation on surface morphology of stainless steels,” Surface Engineering, 33(10), 747–755, 2017.
[14] X. Zhang, Y. Li, and Z. Wang, “Optical properties of passive films on stainless steels,” Applied Surface Science, 457, 980–987, 2018.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Paslanmaz Çelik Üzerine Farklı Kaynak Akımlarında Stellite 21 Kaplanması

Seray Poyraz[a,], Serkan Apay[a]*

[a]Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[*] **Sorumlu Yazar:** seray_ozkan98@hotmail.com

ÖZET

Stellite 21 kobalt esaslı süper alaşımlar; üstün biyouyum özellikleri sayesinde biyomedikal alanda, yüksek sıcaklık kararlılıkları nedeniyle de havacılık endüstrisinde stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, korozyon direnciyle öne çıkan AISI 304 kalite paslanmaz çeliklerin yüzey özellikleri, sinerjik ark kaynağı yöntemiyle gerçekleştirilen Stellite 21 kaplamaları aracılığıyla geliştirilmiştir. Deneysel süreçte, 100 mm uzunluğundaki numuneler üzerine 0,5-1 mm derinliğinde ve 10 mm genişliğinde kanallar hassas biçimde açılmıştır. Toz formdaki alaşım elementlerinin ark enerjisi etkisiyle kayıplarını önlemek adına, partiküller yüksek saflıkta alkol ile karıştırılarak homojen bir bulamaç haline getirilmiş ve bu kanallara yerleştirilmiştir. Kaplama işlemleri; normal, pulse ve double pulse akım olmak üzere üç farklı enerji transfer modu altında gerçekleştirilerek sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Metalurjik incelemeler sonucunda, kaplama tabakası ile ana malzeme arasında sürekliliği yüksek ve hatasız bir metalurjik bağ kurulduğu, mikroyapıda ise karakteristik dendritik fazların baskın olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik analizleri, double pulse modunun sağladığı kontrollü ısı girdisi ve beraberinde gelen tane rafinasyonu sayesinde, diğer akım tiplerine oranla çok daha homojen ve yüksek mikrosertlik sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *AISI 304 Paslanmaz çelik, Double pulse akımı, Sinerjik kaynak, Stellite 21, Yüzey kaplama (Sert Dolgu).*

Stellite 21 Coating on Stainless Steel with Different Welding Currents

ABSTRACT

Stellite 21 cobalt-based superalloys hold strategic importance in the biomedical field due to their superior biocompatibility and in the aerospace industry due to their high-temperature stability. In this study, the surface properties of AISI 304 grade stainless steels, known for their corrosion resistance, were enhanced through Stellite 21 coatings applied via the synergistic arc welding method. During the experimental process, channels with a depth of 0,5–1 mm and a width of 10 mm were precisely machined onto 100 mm long specimens. To prevent the loss of alloying elements in powder form under the influence of arc energy, the particles were mixed with high-purity alcohol to form a homogeneous slurry and placed into these channels. The coating processes were systematically compared by performing them under three different energy transfer modes: standard, pulse, and double pulse current. Metallurgical investigations revealed a defect-free metallurgical bond with high continuity between the coating layer and the base material, while the microstructure was dominated by characteristic dendritic phases. Hardness analyses determined that the double pulse mode, owing to its controlled heat input and the resulting grain refinement, yielded significantly more homogeneous and higher microhardness results compared to the other current modes.

Keywords: *AISI 304 Stainless steel, Double pulse current, Synergic welding, Stellite 21, Surface coating (Hardfacing).*

I. GİRİŞ

Günümüzde metal yüzeylerin modifikasyonunda ve aşınmaya karşı yüksek dirençli katmanların oluşturulmasında kullanılan Sinerjik MIG kaynağı, ergitmeli kaynak teknolojileri içerisinde stratejik bir konuma sahiptir. Bu yöntem; seri üretim süreçlerine sağladığı hız, farklı çalışma pozisyonlarında sunduğu kusursuz işlem kabiliyeti ve robotik otomasyon sistemlerine tam adaptasyonu sayesinde endüstriyel alanda

geniş bir uygulama yelpazesine hitap etmektedir. Sinerjik kontrol mekanizmaları, tel besleme hızı ile akım şiddeti arasındaki ilişkiyi optimize ederek ark kararlılığını kendiliğinden dengeler; bu durum operatör kaynaklı hataları minimize ederek üst düzey kaynak dikiş kalitesine ulaşılmasını sağlar [1].

Kaynak prosesi esnasında birim uzunluk başına transfer edilen ısı girdisi, kaplama tabakasının niteliğini belirleyen en temel parametre olarak kabul edilir. Isı girdisinin kontrolsüz bir biçimde yükselmesi, malzemede sadece makroskobik düzeyde termal çarpılma ve boyutsal değişimlere neden olmakla kalmaz; aynı zamanda ana metal ile kaplama tabakası arasındaki hassas metalürjik dengenin bozulmasına da yol açabilir [2]. Özellikle paslanmaz çelikler gibi ısıl hassasiyeti yüksek malzemelerin yüzey modifikasyonunda, enerji girdisini sınırlandıran pulse ve double pulse akım modları; ergime hatalarının minimize edilmesine ve mikroyapıda çok daha rafine (ince) tane yapılarının elde edilmesine olanak tanır [3].

Kobalt esaslı süper alaşımlar içerisinde yer alan Stellite 21; yüksek sıcaklıklardaki yapısal bütünlüğü, mükemmel korozyon direnci ve biyolojik sistemlerle olan ileri derecedeki uyumu ile dikkat çeken bir malzemedir [4]. Yapısındaki karbür yapıcı elementler sayesinde, aşınma mekanizmalarının yoğun olduğu havacılık komponentlerinde ve medikal implant uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. Stellite 21 alaşımının sunduğu bu özgün karakteristik, AISI 304 gibi genel amaçlı paslanmaz çeliklerin yüzey performansını bir üst seviyeye taşımayı hedefleyen modern araştırmalara temel teşkil etmektedir [5].

Metalik yüzeylerin çalışma koşullarında yetersiz kaldığı senaryolarda, yüzeyin süper alaşımlar ile zırhlanması (hardfacing) en etkin çözüm yollarından biridir. Bu çalışmanın özgünlüğü; Stellite 21 alaşımının toz formda kullanılarak, özel tasarlanmış kanallar aracılığıyla ana metal yüzeyine entegre edilmesi ve ark enerjisiyle eş zamanlı ergitilmesinden kaynaklanmaktadır. Toz fazdaki alaşım elementlerinin hızlı katılaşma süreci, kaynak dikişinde sert dendritik fazların gelişimini tetikleyerek yüzeyin mekanik direncini maksimize etmektedir [6].

Sinerjik Pulse ve Double Pulse MIG kaynak tekniklerinin sunduğu düşük ısı girdisi avantajı, bu araştırmada Stellite 21 tozunun paslanmaz çelik üzerine başarıyla kaplanmasını mümkün kılmıştır. Bu çalışma kapsamında; normal, pulse ve double pulse akım rejimleri kullanılarak hazırlanan numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen kaplama tabakalarının sertlik performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

II. MATERYAL METOT

Bu araştırmada, endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olan AISI 304 kalite paslanmaz çelikler ana malzeme olarak kullanılmıştır. Isı dağılımının homojenliğini korumak ve kaplama bölgesinde standart bir geometrik form elde etmek amacıyla numuneler 100 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Kaplama sürecinin stabilitesini artırmak ve Stellite 21 toz partiküllerinin yüzeyde kararlı bir hat üzerinde toplanmasını sağlamak için numunelerin üst yüzeyine, talaşlı imalat yöntemleriyle 10 mm genişliğinde ve 0,5-1 mm derinliğinde kanallar açılmıştır.

Çalışmada kullanılan ana metal ve Stellite 21 tozunun kimyasal bileşimleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. AISI 304 Paslanmaz Çelik ve Stellite 21 Tozunun Kimyasal Bileşimleri (% Ağırlık)

	Co	**Cr**	**Mo**	**Ni**	**C**	**Si**	**Mn**	**Fe**
AISI 304	-	18,0-20,0	-	8,0-10,5	0,08	0,75	2,0	Kalan
Stellite 21	Kalan	26,0-29,0	4,5-6,0	2,0-3,0	0,20-0,35	1,5	1,5	3,0

Arkın oluşturduğu yüksek plazma hızı ve koruyucu gaz debisi nedeniyle toz fazdaki alaşım elementlerinin kaynak havuzundan sürüklenerek uzaklaşmasını önlemek amacıyla Stellite 21 tozları yüksek saflıktaki alkol ile harmanlanarak bir karışım haline getirilmiş ve açılan kanallara titizlikle yerleştirilmiştir. Alkolün kontrollü bir şekilde buharlaşmasıyla toz tabakası kanal içerisinde sabitlenmiş ve kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir [7].

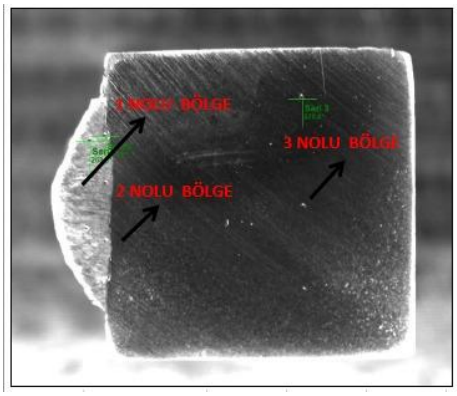
Kaplama prosedürü, gelişmiş ark yönetimi kabiliyetine sahip Sinerjik MIG kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Akım karakteristiğinin mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkilerini tayin etmek amacıyla; normal, pulse ve double pulse olmak üzere üç farklı akım modu Tablo 2'de belirtilen parametreler doğrultusunda uygulanmıştır.

Tablo 2. Farklı akım modlarına göre belirlenen deneysel kaynak parametreleri

	Normal Akım	**Pulse Akım**	**Double Pulse Akım**
Voltaj (V)	20,2-30,3	21,3	21,2
Akım (A)	136-280	97	96

Kaynak işlemlerinin tamamlanmasının ardından, metalografik karakterizasyon çalışmaları için numunelerden testere yardımıyla enine kesitler alınmıştır. Kesit yüzeyleri, mikroyapısal detayların

netleştirilmesi amacıyla standart zımparalama ve parlatma prosedürlerinden geçirilmiştir. Mikroyapısal fazların ve tane sınırlarının görünürlüğünü artırmak için numuneler; salisilik asit ve saf su içerikli elektrolit içerisinde, 40 saniye süreyle elektrolitik dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin iç yapı incelemeleri optik mikroskop (OM) ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamanın mekanik performansını belirlemek amacıyla, kaplama tabakasından ana metale doğru derinlik boyunca Vickers mikrosertlik ölçümleri Şekil 1'de gösterilen şematik plana uygun olarak yapılmıştır [7].



Şekil 1. Numune mikrosertlik ölçüm bölgeleri

III. SONUÇLAR

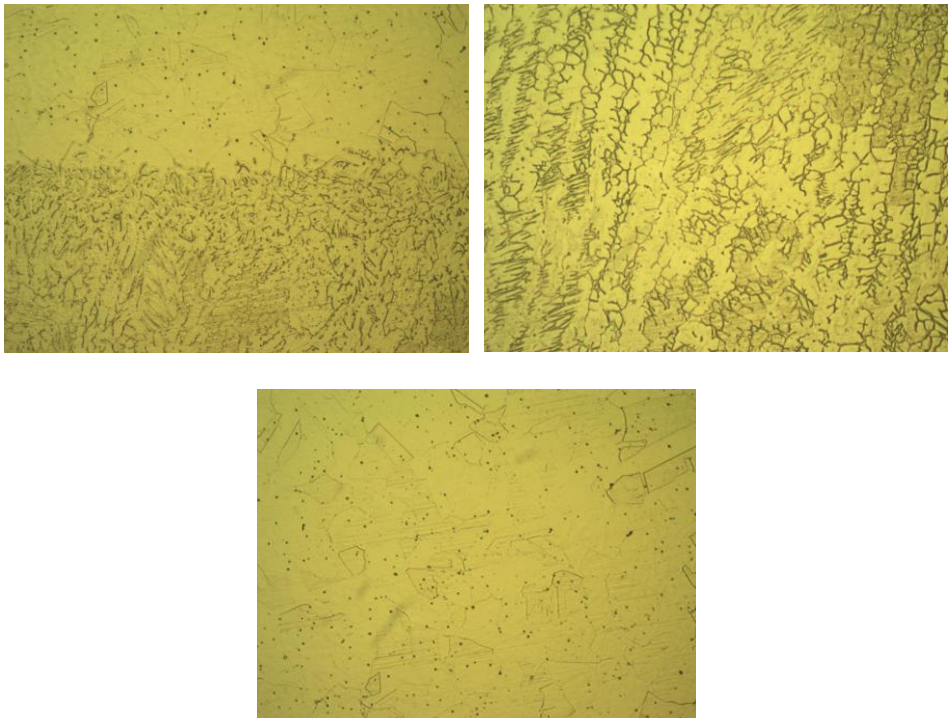
Bu bölümde, farklı akım modları kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucunda elde edilen mikroyapı incelemeleri ile sertlik ölçümlerine ait bulgular değerlendirilmiştir.

A. Mikroyapısal Karakterizasyon ve Bölgesel Analiz

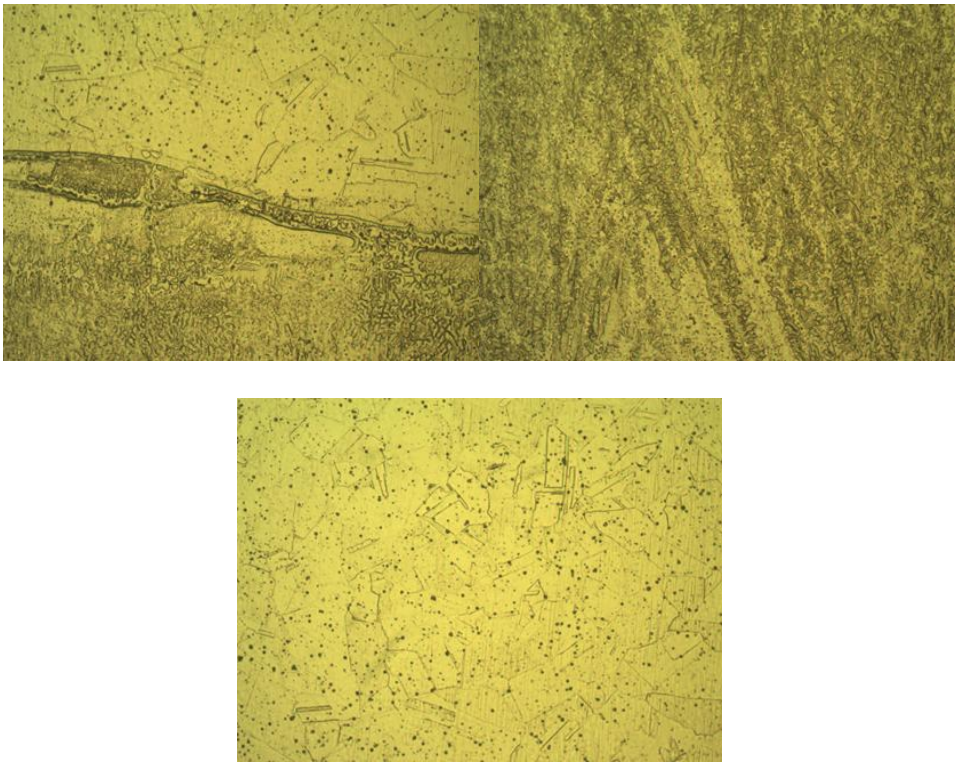
Gerçekleştirilen makro ve mikroskobik incelemeler sonucunda, kaynaklı numunelerin yapısal karakteristiklerine göre üç temel bölgeye ayrıldığı tespit edilmiştir. Şekil 1'de detaylandırıldığı üzere bu bölgeler; Stellite 21 dolgu bölgesi (kaynak metali), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve ana malzeme olarak tanımlanmıştır.

Yapılan optik mikroskop (100x, 200x ve 500x büyütme oranlarında) incelemeleri, ana malzemenin (3 nolu bölge) büyük ölçüde başlangıç mikroyapısını koruduğunu tespit etmiştir. Bu bölgede yapının, belirgin tane sınırlarına sahip eş eksenli tanelerden oluştuğu ve bazı alanlarda karakteristik ikizlenme (twinning) oluşumlarının mevcudiyeti gözlenmiştir. Dolgu metali ile ana malzeme arasındaki birleşme hattını oluşturan Geçiş Bölgesi / ITAB (2 nolu bölge) boyunca ise, kaynak işlemi sırasındaki ısıl çevrimlerin etkisiyle tane morfolojisinde belirgin değişimlerin meydana geldiği belirlenmiştir.

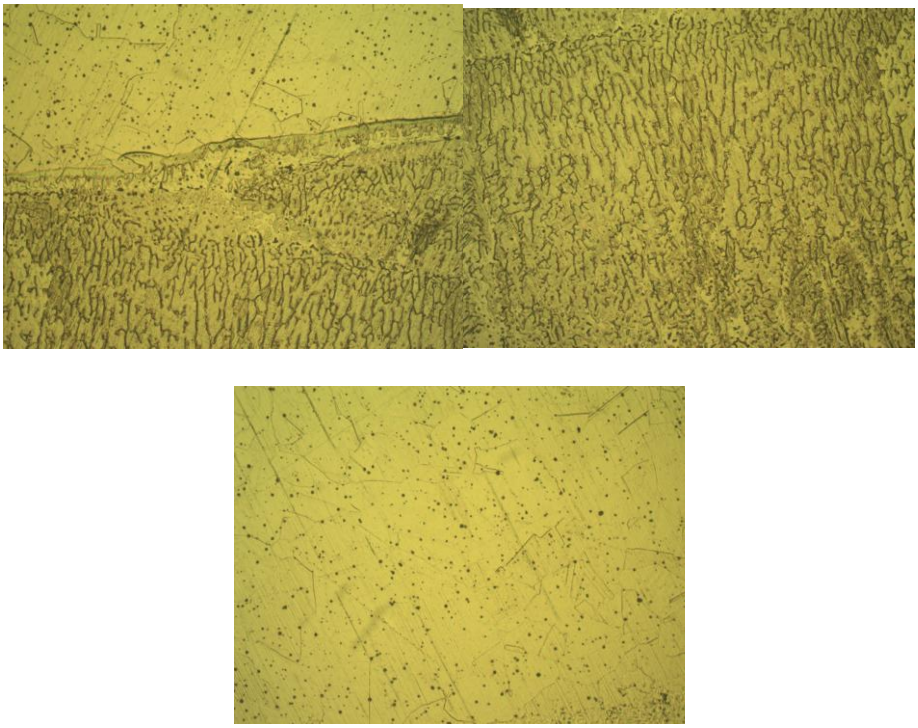
Stellite 21 Dolgu Bölgesi (1 nolu bölge) analiz edildiğinde, toz malzemenin ark ortamında eriyerek boşluğu doldurması ve ardından gerçekleşen hızlı katılaşma süreci neticesinde karakteristik bir dendritik mikroyapının geliştiği saptanmıştır. Farklı akım modlarının bu dolgu yapısı üzerindeki etkileri Şekil 2, 3 ve 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu kapsamda Şekil 2'de sunulan normal akım modu ile gerçekleştirilen dolgu işlemine ait mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, dendritik kolların daha kaba ve belirgin bir morfoloji sergilediği gözlemlenmiştir. Buna karşılık Şekil 3'te yer alan Pulse akım modu görüntülerinde, darbeli akımın etkisiyle dendritik yapı içerisinde belirli bir incelme meydana geldiği saptanmıştır. En belirgin değişim ise Şekil 4'te sunulan Double Pulse akım modunda kaydedilmiştir.Bu modda çok daha keskin bir tane rafinasyonu oluştuğu, dendritik yapının diğer modlara kıyasla çok daha ince ve sıkı bir morfoloji sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 2. Normal akım modu ile gerçekleştirilen dolgu işleminin mikroyapısı.



Şekil 3. Pulse akım modu ile gerçekleştirilen dolgu işleminin mikroyapısı.



Şekil 4. Double Pulse akım modu ile gerçekleştirilen dolgu işleminin mikroyapısı.

B. Sertlik Testi Sonuçları

Farklı akım parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen Vickers sertlik (HV) ölçümlerinin ortalama değerleri Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Farklı akım modlarına göre ortalama Vickers sertlik (HV) değerleri

	1 NOLU BÖLGE	**2 NOLU BÖLGE**	**3 NOLU BÖLGE**
NORMAL AKIM	151,3	168,3	203,3
PULSE AKIM	155	201	230
DOUBLE PULSE AKIM	195,6	209,3	255

Tüm numuneler değerlendirildiğinde sertlik değerlerinin kaynak merkezinden (1 nolu bölge) ana malzemeye (3 nolu bölge) doğru artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun, kaynak işlemi sırasında meydana gelen mikroyapısal değişimler ve termal etkiler ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda, tüm bölgelerde en yüksek sertlik değerlerinin Double akım yöntemi ile elde edilen numunelerde ölçüldüğü görülmüştür. Özellikle kaynak metalinde (1 nolu bölge) normal akım modunda ortalama 151,3 HV olarak ölçülen sertlik değerinin, Double akım modunda 195,6 HV seviyesine yükseldiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen en yüksek sertlik değeri ise Double akım uygulanan numunenin ana malzeme bölgesinde (3 nolu bölge) ölçülmüş olup yaklaşık 255 HV olarak kaydedilmiştir.

IV. TARTIŞMA

A. Mikroyapı ve Sertlik İlişkisi

Sertlik değerlerinde 1 nolu bölgeden 3 nolu bölgeye doğru gözlenen artış, kaynak sırasında oluşan ısı girdisinin malzeme üzerindeki tavlama etkisini doğrulamaktadır. Kaynak metalindeki (1 nolu bölge) göreceli düşük sertlik değerleri dikişin daha sünek bir karakter sergilediğine işaret ederken; ana malzemenin (3 nolu bölge) yüksek sertliğini muhafaza etmesi, malzemenin başlangıçtaki orijinal ısıl işlem durumunun bir sonucudur.

B. Akım Modunun Tane Rafinasyonuna Etkisi

Double Akım modunda elde edilen sertlik artışının, doğrudan mikroyapıdaki dendritik rafinasyon ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. "Double Pulse" yönteminin kaynak havuzunda tetiklediği periyodik çalkalanma etkisi, kaba dendritik kolların parçalanmasını sağlayarak daha rafine bir iç yapı oluşturmuştur. Literatürde "termal dövme etkisi" (thermal forging effect) olarak tanımlanan bu olgu, mevcut çalışma bulgularıyla örtüşmektedir [8]-[10]. Ayrıca, rafine edilen dendritik yapı ve artan tane sınırı yoğunluğu, plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerini kısıtlayarak malzemenin sertlik direncini artırmıştır [11]. Elde edilen 195,6 HV değeri, bu mikroyapısal dönüşümün doğal bir yansımasıdır.

C. Literatür Karşılaştırması

Pulsed-current (darbeli akım) tekniklerinin mikroyapı üzerindeki tane küçültücü etkisi, Smith ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmalarla da örtüşmektedir [8]. Arkın bu darbeli yapısı, sürekli moda kıyasla ısı girdisini çok daha iyi kontrol etmemize olanak tanımış; bu da ITAB (2 nolu bölge) genişliğini daraltarak sertlik profilinin (Double akımda 209,3 HV) daha homojen dağılmasını sağlamıştır [9]. Nitekim Zhang ve ark. (2023) da çift darbeli akım karakteristiğinin kaynak havuzunda yarattığı yüksek frekanslı salınımların, kaba dendritik yapıları parçalayarak mekanik özellikleri iyileştirdiğine dikkat çekmektedir [10]. Çalışmamızda elde edilen 195,6 HV değerinin, daralan tane sınırlarının dislokasyon hareketlerini kısıtlamasıyla açıklanması, literatürdeki bu genel eğilimi doğrular niteliktedir [11]. Ayrıca Kumar ve ark. (2021), darbeli akım modunun segregasyonu azaltıp daha kararlı faz oluşumlarını tetiklediğini, bunun da sertlik ile korozyon direnci arasında pozitif bir ilişki yarattığını belirtmiştir [12].

D. Gelecek Çalışmalar ve Beklenen Veriler

Bulguların atomik düzeyde teyit edilmesi ve mekanik performansın kapsamlı analizi için ileri karakterizasyon testleri planlanmıştır. Bu kapsamda, SEM ve EDS analizleri ile tane sınırı çökelmelerinin yüksek çözünürlükte görüntülenmesi ve elementel segregasyon haritalarının çıkarılması hedeflenmektedir. Ayrıca, farklı akım modlarının yüzey dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek adına tribolojik aşınma testleri gerçekleştirilecektir. Yapısal sertliklerine bağlı olarak, Double Pulse Akım numunelerinin en düşük aşınma oranını sergilemesi öngörülmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

• **En Yüksek Sertlik Performansı:** Tüm bölgelerde en yüksek sertlik değerleri Double Pulse Akım yöntemi ile elde edilmiştir. Kaynak metalinde (1 nolu bölge) normal akıma kıyasla sertliği 151,3 HV'den 195,6 HV'ye çıkararak yaklaşık %29'luk bir artış sağlamıştır. Bu da malzemenin direncinin ne kadar iyileştiğini kanıtlar niteliktedir.

• **Tane Yapısındaki İncelme:** Kaynak metalinde saptanan dendritik yapı, Double Pulse Akım modunda kullanılan darbeli enerji sayesinde daha ince ve rafine bir morfolojiye dönüşmüştür.

• **Sertlik Dağılım Profili:** Sertlik değerleri kaynak merkezinden ana malzemeye doğru artış göstermiş, maksimum değer ana malzeme bölgesinde 255 HV olarak ölçülmüştür.

• **Homojen Geçiş:** Double Akım uygulaması, kaynak dikişi ve ITAB (2 Nolu Bölge) arasında daha dengeli bir sertlik geçişi sağlayarak mikroyapısal kararlılığı arttırmıştır.

• **Literatürle Uyum:** Bulgular, literatürdeki "termal dövme etkisi" ile uyumlu olup, çift darbeli akımın tane küçülterek mekanik özellikleri iyileştirdiğini doğrulamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde değerli katkılarını esirgemeyen ve tecrübeleriyle yol gösteren danışman hocam **Doç.Dr Serkan APAY**'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, deneylerin hazırlık ve analiz aşamalarında laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi yönetimine şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, BAP tarafından 2025.06.05.1612 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Balasubramanian, V., et al. (2008). "Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy," *Materials & Design*, 29(7), 1425-1431.

[2] Davis, J. R. (2002). *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ASM International, Materials Park, Ohio.

[3] Donachie, M. J. (2002). *Superalloys: A Technical Guide*, 2nd Edition, ASM International.

[4] Kahraman, N., ve Gülenç, B. (2016). *Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları*, Üniversite Yayınları.

[5] Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.

[6] Yeşildal, R., ve Günay, M. (2007). "Paslanmaz çeliklerin yüzey sertleştirme yöntemleri üzerine bir inceleme," *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 153-162.
[7] S. Budak ve S. Apay, "Farklı akım türleri ile AISI 304 paslanmaz çelik milin BC4 kaplanması," *International Symposium on Boron (ISBOR)*, Bildiri Kitabı, ss. 318-325, 2019.
[8] Smith, J., Johnson, A., & Lee, K. (2022). "Effect of Pulsed-Current Parameters on Grain Refinement in Nickel-Based Superalloy Welds," *Journal of Materials Processing Technology*, 302, 117-128.
[9] Brown, M., & Davis, R. (2022). "Thermal Gradient and Heat Input Control in Double-Pulse GMAW Processes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 184, 122-135.
[10] Zhang, Y., Wang, X., & Liu, H. (2023). "Dendritic Fragmentation and Microstructural Evolution in Double-Pulse Current Welding of Cobalt-Based Alloys," *Materials Characterization*, 195, 110-122.
[11] Thompson, G., & White, S. (2021). "Dislocation Obstacle Mechanisms and Hardness Gradients in Surface-Clad Industrial Alloys," *Surface and Coatings Technology*, 410, 126-139.
[12] Kumar, R., Singh, P., & Sharma, V. (2021). "Influence of Synergic Pulsed Current on Elemental Segregation and Surface Hardness of Stellite 21 Overlays," *Welding in the World*, 65(8), 1453-1465.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Düşük Voltajlı Karbon Fiber Rezistans Entegrasyonunun LVL Tabanlı Oturma Elemanlarında Termal Performansının Ön Değerlendirmesi

Seymen Çiftçi[a]

[a]Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü,, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** seymenciftci@duzce.edu.tr

ÖZET

Ahşap esaslı mühendislik malzemeleri, sürdürülebilirlik, estetik ve mekanik performans avantajları nedeniyle yapı ve mobilya sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikle dış mekân oturma elemanlarında kullanıcı konforunu artırmaya yönelik fonksiyonel çözümler sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada, düşük voltajla çalışan karbon fiber rezistans elemanının Laminated Veneer Lumber (LVL) yapısı içerisine üretim esnasında entegre edilmesiyle geliştirilen ısıtmalı bir oturma elemanının ön performans değerlendirmesi yapılmıştır. Deney numuneleri kayın kaplamalardan 6 katlı LVL formunda üretilmiş ve rezistans elemanı üst yüzeye yakın bir konuma yerleştirilmiştir. Sistem 5V ve 2A elektrik akımı altında test edilmiş, yüzey sıcaklık değişimleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, sistemin kısa sürede 35–40°C aralığında sıcaklığa ulaşabildiğini ve yüzeyde homojen bir ısı dağılımı sağladığını göstermiştir. Düşük enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji sistemleri ile uyumluluğu, geliştirilen sistemin dış mekân mobilyalarında uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu çalışma, ahşap esaslı kompozitlerde fonksiyonel entegrasyon yaklaşımına katkı sağlayan ön nitelikli bir araştırma olup, akıllı mobilya sistemleri için önemli bir altyapı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *LVL, Karbon fiber rezistans, Isıtmalı mobilya, Termal performans, Ahşap kompozitler*

Preliminary Evaluation of the Thermal Performance of Low-Voltage Carbon Fiber Resistor Integration in LVL-Based Seating Elements

ABSTRACT

Wood-based engineered materials are widely used in the construction and furniture industries due to their sustainability, aesthetic qualities, and favorable mechanical performance. However, functional solutions aimed at improving user comfort, particularly in outdoor seating applications, remain limited. In this study, a preliminary performance evaluation of a heated seating element developed by integrating a low-voltage carbon fiber resistive heating element into a Laminated Veneer Lumber (LVL) structure during the manufacturing process was conducted. Experimental specimens were produced in the form of six-layer LVL panels using beech veneers, and the resistive heating element was positioned close to the upper surface. The system was tested under an electrical input of 5 V and 2 A, and surface temperature variations were recorded as a function of time. The results indicated that the system was able to reach temperatures in the range of 35–40°C within a short period and provided a relatively homogeneous heat distribution across the surface. The low energy consumption and compatibility with renewable energy systems increase the applicability of the developed system for outdoor furniture applications. This study represents a preliminary investigation contributing to the functional integration of heating systems in wood-based composites and provides an important foundation for the development of smart furniture systems.

Keywords: *LVL, Carbon fiber resistors, Heated furniture, Thermal performance, Wood composites.*

I. GİRİŞ

Ahşap esaslı mühendislik malzemeleri, sürdürülebilirlik, estetik ve mekanik performans avantajları nedeniyle yapı ve mobilya sektöründe geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir [1]. Ahşap, çevresel

sürdürülebilirliği ve karbon depolama kapasitesi ile inşaat ve mobilya sektöründe beton gibi geleneksel malzemelere göre düşük emisyonlu bir alternatif sunmaktadır [2], [3]. Bununla birlikte, ahşap esaslı kompozitlerin mekanik dayanımını ve yapısal işlevselliğini artırmak amacıyla karbon fiber gibi mühendislik liflerinin entegrasyonu, malzemenin performans sınırlarını genişleten etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [4]. Özellikle, ahşap tabakaların arasına yerleştirilen karbon fiber takviyeler, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra termal iletkenliği artırarak akıllı mobilya uygulamaları için gerekli olan fonksiyonel altyapıyı sağlamaktadır [5], [6]. Bu bağlamda karbon fiber kumaşların LVL katmanları arasına stratejik yerleşimi, malzemenin hem mekanik mukavemetini hem de elektro-termal iletkenliğini optimize ederek kullanıcı konforunu maksimize eden hibrit yapılar oluşturulmasına olanak tanımaktadır [7]. Buna ek olarak, lignine dayalı karbon liflerinin LVL yapılarında kullanılması, elastik modülü ve eğilme dayanımında sağlanan artışla birlikte yapısal verimliliği de önemli ölçüde desteklemektedir [8]. Bu tür modifikasyonlar, ahşabın doğal olarak gözenekli yapısının termal ve mekanik özelliklerinin hassas bir şekilde ayarlanarak akıllı ev uygulamalarında fonksiyonel bir bileşene dönüştürülmesine imkân tanımaktadır [9]. Gelecekteki araştırmalar, bu tür entegre sistemlerin uzun süreli kullanımı sırasında oluşabilecek olası yorulma etkilerini ve çevresel faktörlerin (nem, UV ışınları) malzeme dayanımı üzerindeki kümülatif sonuçlarını detaylandırmayı hedeflemektedir [10]. Ayrıca, akıllı ev teknolojileriyle entegre edilen bu biokompozitlerin antistatik özelliklerinin ve artırılmış ısıl iletkenlik kapasitelerinin, sürdürülebilir mobilya tasarımında enerji verimliliğini optimize eden bir çözüm sunması öngörülmektedir [11]. Geliştirilen bu entegrasyon yöntemi, ağaç esaslı malzemelerin yalnızca statik birer bileşen değil, aynı zamanda biyo-elektronik sistemlerin temelini oluşturan aktif birer arayüz olarak yeniden tanımlanmasına katkıda bulunmaktadır [12].

Ahşap esaslı malzemelerin yapısal ve termal optimizasyonu üzerine yürütülen çalışmalar, mühendislik ahşap ürünlerinin çevresel ve işlevsel kapasitelerini artırma potansiyeline odaklanmaktadır [13], [14]. Özellikle, ısıl işlem uygulanmış ahşabın yapısal özelliklerinin iyileştirilerek mobilya endüstrisine yeni fırsatlar sunması, malzeme modifikasyonuna yönelik çevre dostu yaklaşımların önemini artırmaktadır [1]. Lamine ağaç levhaların mekanik direncini artırmak amacıyla katmanlar arasına karbon fiberlerin yerleştirilmesi, hem eğilme mukavemetini yükseltmekte hem de malzemenin termal modifikasyon süreçlerine uyumunu desteklemektedir [15]. Bununla birlikte, karbon fiber ağlarının çevresel neme ve mekanik zorlanmalara karşı gösterdiği elektriksel direnç değişimleri, bu hibrit yapıların yalnızca ısıtma elemanı olarak değil, aynı zamanda çevresel koşulları anlık olarak izleyebilen öz-algılayıcı (self-sensing) sistemler olarak da işlev görebileceğini ortaya koymaktadır [16], [17]. Bu noktada, kompozit ahşap malzemelerin dayanıklılığını ve çevresel faktörlere karşı direncini artıran ileri üretim tekniklerinin entegrasyonu, akıllı mobilya tasarımında sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir inovasyon potansiyeli sunmaktadır [18]. Buna ek olarak, lignoselülozik maddelerin biyokompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanılması, üretim süreçlerinde enerji talebini minimize ederken sürdürülebilir bir yapısal performans artışı sağlamaktadır [19].

II. MATERYAL METOT

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.

A. Materyal

Deney numuneleri, kayın (Fagus orientalis L.) kaplamalardan üretilmiştir. Kaplamalar yaklaşık 1.5 mm kalınlığında olup, 6 katmanlı LVL yapısı oluşturacak şekilde hazırlanmıştır. Katmanların birleştirilmesinde fenol formaldehit esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır.

Isıtma elemanı olarak karbon fiber bazlı rezistans tercih edilmiştir. Rezistans elemanı, üst yüzeye yakın konumda, en üst kaplama tabakasının hemen altına yerleştirilmiştir. Toplam malzeme kalınlığı yaklaşık olarak 10mm olması hedeflenmiştir.

Kaplamalar lif yönleri paralel olacak şekilde dizilmiş ve pres altında birleştirilmiştir. Rezistans elemanı üretim aşamasında ilgili katmanlar arasına entegre edilmiştir. Numuneler üretim sonrası ölçümler alınmadan önce 20 ± 2 °C sıcaklık ve %65 ± 5 bağıl nem koşullarında iklimlendirme kabininde sabit ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiştir.



Şekil 1. Isıtıcılı LVL katman kombinasyonu (a:1.5 mm kayın kaplama, k: karbonfiber rezistans)

Araştırmada, lamine kaplama kereste tabanlı oturma elemanlarının üretiminde 1,5 mm kalınlığında Kayın (Fagus sylvatica L.) kaplamalar kullanılmıştır. Kompozit yapıyı oluşturmak için yedi katmanlı bir dizilim tercih edilmiş ve katmanların birleştirilmesinde Fenol formaldehit tutkalı uygulanmıştır [6]. Termal işlevsellik kazandırmak amacıyla, rezistans elemanı olarak 200 g/m^2 ağırlığında twill (dimi) dokuma karbon fiber kumaş seçilmiştir. Bu ısıtıcı tabaka, ısının yüzeye hızlı ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamak için üst yüzey kaplamasının hemen altına (ikinci katman olarak) entegre edilmiştir. Literatürde, karbon fiberin ahşap paneller arasına yerleştirilmesinin termal kararlılık ve homojen ısı dağılımı açısından avantajlı olduğu belirtilmektedir [20], [21]. Geliştirilen ısıtmalı LVL panelin performansı, 5V 10000 mAh kapasiteli bir taşınabilir güç kaynağı (power bank) kullanılarak test edilmiştir. Termal kamera ile yapılan ölçümler sonucunda, sisteme enerji verildikten sonra yaklaşık 7 dakika içerisinde 38 °C sıcaklığa ulaşıldığı tespit edilmiştir.

B. Yöntem

Isıtma performansını belirlemek amacıyla numunelere 5V ve 2A elektrik akımı uygulanmıştır. Yüzey sıcaklığı belirli zaman aralıklarında termal kamera kullanılarak ölçülmüş ve sıcaklık-zaman ilişkisi değerlendirilmiştir.

Ölçümler yüzeyin farklı noktalarından alınarak sıcaklık dağılımı analiz edilmiştir. Maksimum sıcaklık ve bu değere ulaşma süresi temel performans kriterleri olarak belirlenmiştir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşük voltajlı karbon fiber rezistans elemanının LVL yapısı içerisine entegre edilmesiyle geliştirilen ısıtmalı bir oturma elemanının ön performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin düşük enerji girdisi ile etkin bir şekilde çalışabildiğini ve kısa süre içerisinde kullanıcı konforu açısından uygun kabul edilen 35–40°C sıcaklık aralığına ulaşabildiğini göstermektedir. Bu durum, geliştirilen sistemin yalnızca teknik olarak uygulanabilir değil, aynı zamanda pratik kullanım açısından da yeterli performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ahşabın düşük ısı iletkenliği, sistemin önemli avantajlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu özellik sayesinde üretilen ısının yüzeyde tutulması kolaylaşmakta ve ani ısı kayıpları sınırlanmaktadır. Böylece, düşük güç tüketimi ile daha stabil bir yüzey sıcaklığı elde edilebilmektedir. Ayrıca ahşabın doğal yapısı, yüzeyde daha homojen bir sıcaklık dağılımına katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle kullanıcı temasının doğrudan olduğu oturma elemanlarında konfor açısından kritik bir parametredir.

Mevcut bulgular, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan rezistif koltuk ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında önemli bir farklılaşmayı ortaya koymaktadır. Otomotiv uygulamalarında ısıtma elemanları genellikle tekstil ve köpük katmanları içerisine entegre edilmekte olup, bu sistemler sıvı teması, nem ve mekanik deformasyonlara karşı daha hassas yapıdadır. Buna karşılık, bu çalışmada geliştirilen LVL tabanlı sistem, daha rijit ve korunaklı bir yapı sunmakta, yüzey kaplama ve malzeme bütünlüğü sayesinde dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı bir alternatif oluşturmaktadır. Bu yönüyle sistem, yalnızca iç mekân uygulamaları ile sınırlı kalmayıp, dış mekân mobilyalarında da kullanılabilecek yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilebilir.

Ahşabın şekil verilebilirliği, geliştirilen sistemin tasarım esnekliğini artıran bir diğer önemli faktördür. Lamine yapı sayesinde farklı geometrilere sahip oturma elemanları üretilebilmekte ve ısıtma sistemi bu formlara entegre edilebilmektedir. Bu durum, kent mobilyaları, tribün oturma elemanları, otobüs durakları ve açık alan dinlenme üniteleri gibi birçok farklı uygulama alanı için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca sistemin düşük voltaj ile çalışabilmesi, güneş paneli gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonunu mümkün kılmakta ve enerji bağımsız çözümler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte, bu çalışma ön nitelikte olup sistemin uzun vadeli performansına ilişkin kapsamlı değerlendirmeler içermemektedir. Gelecek çalışmalar için aşağıdaki araştırma başlıkları önerilmektedir:

- Isıtma sisteminin LVL'nin mekanik özellikleri (eğilme dayanımı, elastikiyet modülü) üzerindeki etkisinin belirlenmesi

- Isıtma-soğutma döngülerinin yapıştırıcı hatları ve tabakalar arası dayanım üzerindeki etkisinin incelenmesi
- Uzun süreli dış ortam koşullarında (nem, yağmur, sıcaklık değişimi) sistem performansının değerlendirilmesi
- Farklı rezistans yerleşim stratejilerinin ısı dağılımına etkisinin analiz edilmesi
- Enerji tüketimi ve sistem verimliliğinin nicel olarak modellenmesi
- Yüzey kaplama sistemlerinin (su itici, UV dayanımlı kaplamalar) performansa etkisinin araştırılması

Sonuç olarak, geliştirilen sistem ahşap esaslı kompozit malzemelerde fonksiyonel entegrasyon yaklaşımının uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve geleneksel ısıtma sistemlerine alternatif, enerji verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Özellikle dış mekân kullanımına yönelik olarak geliştirilmiş olması, çalışmayı mevcut literatürdeki benzer uygulamalardan ayıran önemli bir katkı niteliği taşımaktadır. Bu yönüyle çalışma, akıllı mobilya sistemleri ve kullanıcı odaklı tasarım yaklaşımları açısından gelecekte yapılacak araştırmalar için güçlü bir temel oluşturmaktadır.

IV. TARTIŞMA

Elde edilen veriler, karbon fiber entegreli LVL panellerin düşük gerilim altında dahi hızlı ve dengeli bir termal yanıt verebildiğini doğrulamaktadır. Özellikle, karbon fiber katmanların yapı içerisindeki homojen dağılımı, ısıl iletkenliği maksimize ederek enerji kaybını minimize eden bir termal verimlilik sunmaktadır [22]. Bu ısıl karakteristik, lif yönelimlerine bağlı olarak malzemenin termal iletim katsayısının farklılık gösterebileceğini, dolayısıyla iç yapıda tabaka oryantasyonunun ısı dağılımı üzerindeki kritik rolünü pekiştirmektedir [23]. Ayrıca, kullanılan tutkalın ve karbon fiberin ara yüzeyindeki yapışma kalitesi, nemli ortamlarda malzemenin elektriksel direnç kararlılığını ve yapısal bütünlüğünü doğrudan etkileyen bir faktör olarak değerlendirilmelidir [24]. Özellikle, lifli yapıların reçine ile etkileşimi sırasında tutkalın sürülme miktarı ve basınç parametrelerinin, iletken katmanların uzun vadeli elektriksel sürekliliği üzerinde belirleyici bir role sahip olduğu görülmektedir [25]. Nitekim, ısıtıcı katmanın yüzeye yakın konumlandırılması, iletim direncinin azaltılarak daha düşük güç değerlerinde bile yüksek ısı transfer verimliliği sağlanmasına olanak tanımaktadır [26]. Ayrıca, bu entegrasyon yöntemiyle elde edilen düşük voltajlı termal yanıt, ticari kullanımdaki yüksek gerilim gerektiren sistemlere kıyasla kullanıcı güvenliğini artırarak pasif mobilyaların aktif, enerji verimli sistemlere dönüştürülmesini desteklemektedir [27]. Daha önceki çalışmalar, bu tür entegre ısıtma sistemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla enerji kullanım oranlarını %11,81 seviyesine kadar artırabildiğini ve daha hızlı bir ısıl denge sağladığını göstermektedir [28]. Bu bağlamda, düşük enerji talebiyle sağlanan bu ısıl verimlilik, yalnızca oturma elemanlarının konforunu artırmakla kalmayıp, aynı zamanda bölgesel ısıtma ihtiyaçlarını karşılayarak genel enerji tasarrufuna da olanak tanımaktadır [29]. Benzer şekilde, büyük ölçekli elektrikli ısıtmalı zemin sistemlerinde gözlemlenen homojen yüzey sıcaklığı dağılımı ve uzun süreli operasyonel kararlılık, bu çalışmada uygulanan karbon fiber entegrasyonunun mobilya ölçeğinde de başarılı bir şekilde ölçeklenebileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır [30].

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, lamine kaplama kereste (LVL) üretim sürecine düşük voltajlı karbon fiber rezistans elemanının entegrasyonu başarıyla gerçekleştirilmiş ve geliştirilen akıllı oturma elemanının elektro-termal performansı ön değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar, sistemin 5V ve 2A gibi oldukça düşük bir enerji girdisi ile insan konforuna en uygun sıcaklık aralığı olan 35–40°C'ye kısa sürede ve homojen bir ısı dağılımıyla ulaşabildiğini doğrulamaktadır. Ahşabın doğal düşük ısı iletkenliği yapısı, üretilen ısının yüzeyde kararlı bir şekilde korunmasını sağlayarak enerji verimliliğini optimize etmiştir. Geliştirilen bu hibrit biokompozit sistemin, geleneksel otomotiv koltuk ısıtma sistemlerine kıyasla mekanik etkilere ve dış ortam şartlarına karşı daha korunaklı ve rijit bir alternatif sunduğu görülmüştür. Sistemin düşük voltaj (5V DC) gereksinimi, taşınabilir güç kaynakları (power bank) ve fotovoltaik (güneş enerjisi) paneller ile doğrudan entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu durum, özellikle akıllı şehir mobilyaları, otobüs durakları ve açık alan dinlenme üniteleri gibi şebekeden bağımsız (off-grid) çalışması hedeflenen yenilikçi endüstriyel tasarımlar için yüksek bir ticari ve ekolojik potansiyel barındırmaktadır. Sonuç olarak bu araştırma, ahşap esaslı mühendislik malzemelerini pasif bir yapı bileşeni olmaktan çıkarıp aktif ve fonksiyonel birer arayüze dönüştürme noktasında literatüre ve akıllı mobilya teknolojilerine öncü bir altyapı sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Üretim ve malzeme tedarikindeki desteklerinden ötürü Sancaklı Mobilya AŞ'ye teşekkür ederim. Ayrıca bu ürün 2024/018666 başvuru numarası ile Türk patent enstitüsüne patent başvurusunda bulunulmuştur.

KAYNAKLAR

[1] E. Çiğdem and O. Perçin, "Karbon fiber ve cam fiber ile güçlendirilmiş ısıl işlem uygulanmış lamine kaplama kerestelerin (lvl) bazı fiziksel ve mekaniksel özellikleri," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 38, no. 2, pp. 653–664, 2022, doi: 10.17341/gazimmfd.984248.

[2] F. J. Rescalvo, R. Duriot, G. Pot, A. Gallego, and L. Denaud, "Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 263, pp. 120185–120185, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120185.

[3] Y. Ding et al. , "Emerging Engineered Wood for Building Applications," *Chemical Reviews*, vol. 123, no. 5, pp. 1843–1888, 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00450.

[4] O. Perçin and O. Uzun, "Physical and mechanical properties of laminated wood made from heat-treated Scotch pine reinforced with carbon fiber," *BioResources*, vol. 18, no. 3, pp. 5146–5164, 2023, doi: 10.15376/biores.18.3.5146-5164.

[5] O. Perçin, "Isıl işlem uygulanmış karbon fiber ile güçlendirilmiş lamine kaplama kerestenin (LVL) hava kurusu yoğunluk ve liflere paralel basınç direncinin belirlenmesi," *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 104–114, 2023, doi: 10.33725/mamad.1268729.

[6] O. Perçin and O. Uzun, "Properties of heat-treated beech laminated veneer lumber reinforced with carbon fiber fabric," *BioResources*, vol. 18, no. 3, pp. 4739–4753, 2023, doi: 10.15376/biores.18.3.4739-4753.

[7] Y. Wang et al. , "Performance Evaluation of Carbon Fiber Fabric-Reinforced Formaldehyde-Free High-Strength Plywood," *Polymers*, vol. 16, no. 18, pp. 2637–2637, 2024, doi: 10.3390/polym16182637.

[8] X. Li, Y. Niu, Z. Jiang, J. Pang, and N. Xiao-yi, "Lignin-Based carbon-fiber-reinforced LVL beams for landscape timber structures," *Polymers*, vol. 17, no. 15, pp. 2030–2030, 2025, doi: 10.3390/polym17152030.

[9] S. He, X. Zhao, E. Q. Wang, G. S. Chen, P. Chen, and L. Hu, "Engineered wood: Sustainable technologies and applications," *Annual Review of Materials Research*, vol. 53, no. 1, pp. 195–223, 2023, doi: 10.1146/annurev-matsci-010622-105440.

[10] N. Sokolović, I. Gavrilović-Grmuša, V. Zdravković, J. Ivanović-Šekularac, D. Pavićević, and N. Šekularac, "Flexural properties in edgewise bending of LVL reinforced with woven carbon fibers," *Materials*, vol. 16, no. 9, pp. 3346–3346, 2023, doi: 10.3390/ma16093346.

[11] Y. Yang et al. , "Sustainable wood fiber composites with antistatic and high-thermal-conductivity performance for energy-efficient home environments," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 13, no. 20, pp. 15075–15087, 2025, doi: 10.1039/d5ta01177a.

[12] H. Zhu et al. , "Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications," Chemical Reviews , vol. 116, no. 16, pp. 9305–9374, 2016, doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00225.

[13] H. K. Çelik and G. Şakar, "Geçmişin ve Geleceğin Yapı Malzemesi Olarak Ahşap: Yapı Mühendisliği Çerçevesinde Bir İnceleme," *European Journal of Science and Technology*, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1108072.

[14] A. E. Kurtoğlu et al. , Ahşap: Doğal ve Yenilenebilir Mühendislik Malzemesi. 2024. doi: 10.5152/5700.

[15] O. Perçin and O. Ülker, "Influence of carbon fibre layers on the strength of thermally modified laminated veneer lumber," Polímeros , vol. 33, no. 1, 2023, doi: 10.1590/0104-1428.20220070.

[16] N. Forintos and T. Czigány, "Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review," *Composites Part B Engineering*, vol. 162. Elsevier BV, pp. 331–343, Oct. 31, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.098.

[17] O. B. Kocoglu, C. Pretschuh, C. Unterweger, M. Kodal, and G. Özkoç, "Development of Electrically Conductive Wood-Based Panels for Sensor Applications," *Polymers*, vol. 16, no. 21, pp. 3026–3026, 2024, doi: 10.3390/polym16213026.

[18] A. Arici, R. Tayyar, P. Usta, and M. Nureddin, "Various advantages of composite wood materials, durability, aesthetic and environmentally friendly properties," *KİÜ Fen, Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1(2), 1-9, 2024

[19] N. Narlıoğlu, "3B yazıcı kullanılarak odun-PLA kompozit filamentinden mobilya bağlantı elemanlarının yazdırılması ve katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi," *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 183–192, 2021, doi: 10.33725/mamad.1026248.

[20] Q. Yuan and F. Fu, "Application of Carbon Fiber Paper in Integrated Wooden Electric Heating Composite," *BioResources*, vol. 9, no. 3, 2014, doi: 10.15376/biores.9.3.5662-5675.

[21] J. Song, H. Hu, M. Zhang, B. Huang, and Z. Yuan, "Thermal aging properties and electric heating behaviors of carbon fiber paper-based electric heating wood floors," *BioResources*, vol. 12, no. 4, pp. 9466–9475, 2017, doi: 10.15376/biores.12.4.9466-9475.

[22] C. Tschannen, A. Shalbafan, and H. Thoemen, "Development of an Electrically Conductive MDF Panel—Evaluation of Carbon Content and Resin Type," Polymers , vol. 15, no. 4, pp. 912–912, 2023, doi: 10.3390/polym15040912.

[23] H. Öztürk, A. U. Birinci, and C. Demirkır, "Yapısal ahşap ürünlerinin ısı yalıtım özellikleri," *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 522-527, 2017

[24] X. Tao, D. Tian, S. Liang, L. Zhang, S. Li, and F. Fu, "Effects of wet treatment on bonding strength and electrothermal performance of electrothermal plywood bonded with emulsion polymer-isocyanate adhesive," *Polymer Composites*, vol. 44, no. 2, pp. 1331–1342, 2022, doi: 10.1002/pc.27173.

[25] O. Perçin and O. Uzun, "Screw withdrawal strength of heat-treated and laminated veneer lumber reinforced with carbon and glass fibers," *BioResources*, vol. 17, no. 2, pp. 2486–2500, 2022, doi: 10.15376/biores.17.2.2486-2500.

[26] S. Yang, C. Su, L. Song, and Q. Yuan, "Composite process and electrothermal properties of a new-type electric heating plywood made with melamine resin adhesive film," *BioResources*, vol. 12, no. 4, pp. 8953–8969, 2017, doi: 10.15376/biores.12.4.8953-8969.

[27] A. Kania and M. Barburski, "Improving local thermal comfort in buildings: a study of properties of heating textile composites in constructıon industry," *Fibres and Textiles*, vol. 30, no. 1, pp. 80–83, 2023, doi: 10.15240/tul/008/2023-1-014.

[28] C. Huang et al. , "Investigation of the Temperature Distribution and Energy Consumption of an Integrated Carbon Fiber Paper-Embedded Electric-Heated Floor," *Buildings*, vol. 14, no. 7, pp. 2097–2097, 2024, doi: 10.3390/buildings14072097.

[29] M. Hambach, H. Möller, T. Neumann, and D. Volkmer, "Carbon fibre reinforced cement-based composites as smart floor heating materials," *Composites Part B Engineering*, vol. 90, pp. 465–470, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.043.

[30] P. Ti et al. , "Large-format preparation technology and electric heating performance of wooden electric heating flooring," *BioResources* , vol. 17, no. 3, pp. 4069–4085, 2022, doi: 10.15376/biores.17.3.4069-4085.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Düzce-Beyköy Geleneksel Konutlarında Kullanılan Yapı Malzemelerinin İncelenmesi

Öznur Keskin[a], Alper Bideci[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Düzce, Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Sanat, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce, Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** oznurkeskin81@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma, Düzce ili Beyköy beldesine bağlı olan Büyükaçma, Muradiye Mengencik, Eski Mengencik ve Ovapınar köylerinde bulunan geleneksel konut örneklerinde kullanılan yapı malzemelerinin türlerini ve kullanım şekillerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Çalışma, kırsal mimarlık mirasının somut yapı taşlarından biri olan yapı malzemelerinin geleneksel üretim kültürünün, çevresel ve kültürel etkenlerle kurduğu ilişkiyi ve bu ilişkiden doğan sonuçları ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu çalışma kapsamında seçilen konutlar saha çalışmalarıyla belgelenmiş olup; yerinde gözlemlenip fotoğraf çekimleriyle desteklenerek ve görsel analizler eklenerek malzeme dağılımı ve yapısal kurguları incelenmiştir. İnceleme süresince kerpiç dolgu duvarlar, tuğla, ahşap (taşıyıcı eleman ve cephe elemanı) kullanılan ve birbirlerini destekleyen malzemelerin birlikte de kullanıldığı karma yapılar önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemelerin tercih edilme sürecinde bölgede bulunan doğal kaynakların erişilebilirliği, iklim bazlı gereksinimler ve geleneksel yapım teknik ve bilgileri yol gösterici olmuştur. Bulgular, incelenen konutların sadece barınma ihtiyacını karşılamak amacıyla yapılan yapılar değil, aynı zamanda bölgenin yerel mimari kimliğini şekillendiren kültürel ögeler olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak çalışma, Beyköy ölçeğinde geleneksel konut mimarisinin malzeme karakteristiğini ortaya çıkararak kırsal yapı mirasının korunmasına ve sürdürülebilmesine yönelik literatüre katkı sağlamayı ve gelecekte yapılacak olan ya da yapılması düşünülen restorasyon çalışmalarına bir altyapı oluşturmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Geleneksel konut, Yapı malzemeleri, Beyköy, Düzce.*

Investigation of Building Materials Used in Traditional Houses of Beyköy-Düzce

ABSTRACT

This study was conducted to examine the types of building materials and their modes of use in traditional housing examples located in the villages of Büyükaçma, Muradiye Mengencik, Eski Mengencik, and Ovapınar, which are affiliated with the Beyköy town of Düzce Province. The study aims to reveal the relationship between building materials, which are among the tangible building blocks of rural architectural heritage, and the traditional production culture shaped by environmental and cultural factors, as well as the outcomes arising from this relationship. Within the scope of this study, the selected houses were documented through field studies; they were examined by means of on-site observations, supported by photographic documentation and supplemented with visual analyses in order to investigate material distribution and structural configurations. During the investigation process, mixed construction systems in which adobe infill walls, brick, and timber (used as structural elements and façade components) were employed together in a complementary manner played a significant role. In the process of selecting these materials, the accessibility of natural resources available in the region, climate-based requirements, and traditional construction techniques and knowledge served as guiding factors. The findings demonstrate that the examined houses are not merely structures built to meet housing needs, but also cultural elements that shape the local architectural identity of the region. As a result, this study aims to contribute to the literature on the preservation and sustainability of rural built heritage by revealing the material characteristics of traditional residential architecture at the Beyköy scale and to provide a foundation for current and future restoration practices.

Keywords: *Traditional housing, Building materials, Beyköy-Düzce.*

I. GİRİŞ

Geleneksel yapılar, bulundukları coğrafyaya uygun yapım tekniklerine ve yapı malzemelerine sahiptir. Aynı zamanda toplumun kültürü, geçim kaynakları ve yaşam tarzı da bu yapı malzemelerine ve yapım tekniklerine yansımıştır. Kullanıcının çevreyle olan etkileşimi, öncesinde çevreyi şekillendirmiştir sonrasında şekillenen çevreden etkilenmiştir [1]. Yapının bulunduğu bölgenin arazi tipi, iklimi ve çevresinde bulunan malzemeler yapının belirleyici özelliklerindendir. Arazi tipine bakılarak konumlandırılan yapılar, yakın çevresinden elde edilen malzemeler kullanılarak inşa edilmektedir.

Geleneksel yapı; bulunduğu çevre ile olan ilişkisini, mekân kurgusunu ve bölgenin yaşam tarzını belirleyici özellikler göstermektedir [2]. Fakat zaman geçtikçe geleneksel yapılarda meydana gelen hasarlar, kullanılan tekniğe ve malzemeye uygun olmayan onarım yöntemleri ve koruma çabaları sorunlara yol açmaya başlamıştır [1]. Son zamanlarda özellikle yapı malzemelerinin üretiminde ve kullanımında sarf edilen yüksek enerjinin sebep olduğu küresel ısınma sorununun dünyada göz ardı edilemeyecek bir tehdit haline gelmesiyle beraber çevreye zararı olmayacak enerji kaynakları arayışı gündeme gelmeye başlamıştır. Bu sebeple beraber sürdürülebilir yapım teknikleri ve çevre dostu malzeme kullanılmasına ilişkin hareketlenmeler olmuştur. Bu nedenler göz önünde bulundurulduğunda geleneksel yapılarda kullanılan ve günümüze kadar varlığını sürdürebilen geleneksel yapı malzemelerine olan ilgi artış göstermiştir. [3] Geleneksel yapıların onarımı ve iyileştirilmesi sürecinde verilen hatalı kararlar ve yanlış koruma teknikleri yapıların ayakta kalma süresini uzatmak ya da mevcutta olduğu şeklinde korumak yerine daha da kısaltmaktadır [1].

Bu çalışma; geleneksel yapılarda kullanılan yapı malzemelerini incelemek, kullanılan malzemelerin özgün yapıdaki güncel durumunu gözlemlemek ve gelecekte gerçekleştirilmek istenen restorasyon çalışmalarına bilimsel bir altlık ve katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma 3 aşamada gerçekleşmiştir.

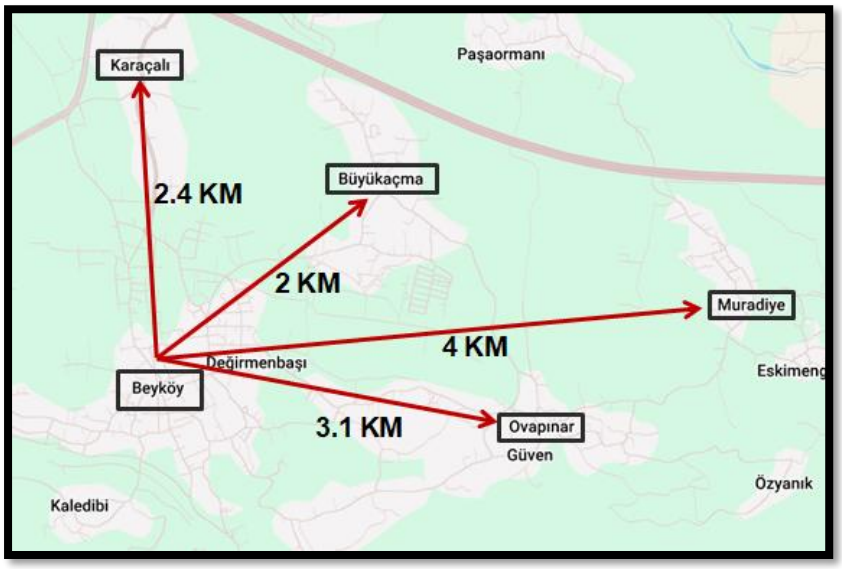
- Literatür taraması yapılarak çalışılacak alanın belirlenmesi; literatürde Düzce ve yakın çevresinde sınırlı sayıda çalışma olduğunu ve Beyköy benzeri küçük yerleşim yerlerinde geleneksel konutlarda kullanılan yapı malzemelerinin incelenerek ileride yapılması düşünülen çalışmalar için bir altyapı olacak bir çalışma olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak aynı zamanda literatüre katkı sağlamak amacıyla beldeye bağlı 4 köyde (Büyükaçma, Ovapınar, Çalıcuma, Muradiye Mengencik) bulunan geleneksel konutlar, kullanıldıkları yapı malzemelerini incelemek için seçilmiştir.
- Geleneksel konutların gözlemlenmesi ve fotoğraflanması; seçilen konutlar yerlerinde gidilip görülmüştür, her birinin tek tek farklı açılardan fotoğrafları çekilmiştir.
- Çekilen fotoğrafların belgelenmesi; 3 köyden seçilen ikişer konutun farklı açılardan çekilen fotoğrafları belgelenmiştir. Çekilen fotoğraflar yapı malzemelerini her açıdan inceleyebilmeyi sağlarken yapılan çalışmaya da bir altlık oluşturmuştur.

Beyköy; Batı Karadeniz' de bulunan Düzce iline bağlı 3 beldeden 1 tanesidir. Düzce'nin güneyinde, 40 derece 15 dakika kuzey enlemleriyle; 30 derece 29 dakika 32 derece 37 dakika doğu boylamları arasında, denizden 190 metre yükseklikteki düz bir arazide bulunmaktadır (Şekil 1). 1992 yılında Belediye olmuştur. Düzce'ye 7 km uzaklıkta ve coğrafi açıdan önemli bir konuma sahiptir. Aynı zamanda Beyköy'e idari açıdan bağlı 19 köy bulunmakta olup 2004 yılında belediye bu köylerden 4 tanesini mücavir alana dahil etmiştir. Bu köyler; Ovapınar, Büyükaçma, Muradiye Mengencik ve Çalıcuma (Karaçalı) köyleridir [4].



Şekil 1. Beyköy'ün konumu

Beldeye 2.4 km uzaklıkta Kuzeyinde Çalıcuma (Karaçalı) köyü, 2 km uzaklıkta Kuzey Doğusunda Büyükaçma, 4 km uzaklıkta Doğusunda Muradiye Mengencik köyü ve 3.1 km uzaklıkta Güney doğusunda Ovapınar köyü bulunmaktadır (Şekil 2) [4].



Şekil 2. Köylerin Beyköy'e göre konumları

III. GELENEKSEL MİMARİ VE YAPI MALZEMELERİ

Geleneksel mimari; inşa edildiği coğrafi konumuyla, bulunduğu bölgenin iklimiyle, kullanıcısı olan toplumun gelenek ve görenekleriyle, üretim ve tüketim şekilleriyle biçimlenen, deneyim ve tecrübeler ile inşa edilmş olan yapılardır. Mimarinin orjinalliğini belirleyen etkenlerden en mühim olanı bulunduğu bölgenin kendine has kullanılan yapı teknikleri ve yapı malzemeleridir [5].

Geleneksel mimarinin oluşmasındaki öne çıkan özellikler:

- Kendine has bir tasarım tekniği yoktur. Yapının strüktürü, malzemesi, bulunduğu yörenin özellikleri ve kullanım şekli yapının formunu belirlemektedir.
- Teknik değişebilir fakat yapı malzemeleri her zaman doğal olmakta ve doğal olandan üretilmektedir.
- Gelenekler gereği etraftaki doğa unsurlarına ve komşulara saygı gösterilmektedir.
- Yapı sistemi kolay anlaşılır ve basit olmaktadır [6].

Süregelen tarih akışı içerisinde kırsal bölgelerde inşa edilmiş olan geleneksel yapılar sürdürülebilirlik ilkesine uygun bir şekilde natürel yapı malzemeleri kullanılarak inşa edilmiştir. Taş, tuğla, ahşap ve kerpiç kullanılan geleneksel yapı malzemeleridir [7].

Kerpiç; kerpiçin bağlayıcı elemanı doğadan elde edilmiş olan killi topraktır. Taşıyıcı olarak kullanılabilmesinin yanısıra sıvama malzemesi olup da kullanılabilir ve ekonomik açıdan uygundur. En eski çağlardan günümüze kadar kullanımı olup imalatı yapılırken üretim tesisi kurulmasına gerek kalmamaktadır. Aynı zamanda ısı yalıtım açısından yüksek değerler alınabilmektedir [8].

Ahşap; ülkemizde taşıyıcı sistem elemanı olarak da kullanılan ahşap yaygın bir şekilde görülmekteydi. Ancak son zamanlarda çelik sistem ve betonarme yapım tekniklerinin gelişmesi sebebiyle ahşap kullanımında bir düşüş gözlenmiştir. Ahşap yüzyıllar boyunca kullanılan eski yapı malzemelerinden biridir. Sağlık açısından ve çevreyle uyum konusunda en uygun değerleri verebilmektedir. Ahşap sistem, yapıların daha büyük ve iç açıcı olmalarına imkân sağlarken, kısa sürelerde inşası tamamlanabilir ve depreme karşı daha fazla dayanıklılık sağlamaktadır. Bu sebeplerle geleneksel mimaride tercih edilmiştir [9].

Harman tuğlası; ismini pişirilmesinin, kurutulmasının ve şekillendiirlmesinin yapıldığı yerden alır. Tuğlanın hammaddesini hazırlamadan paketlemesine kadar tüm süreç harman denilen alanda gerçekleşmektedir. Insan gücüne bağlı olarak imal edilmektedir ve günümüzdeki teknoloji karşısında ilkel kalan geleneksel bir üretimdir. Kullanım yeri, doğal görünümü ve pişme rengi bakımından günümüzde hala daha tercih edilir bir konumdadır. Çoğu yapının onarımı ve restoresinde kullanılmaktadır [10].

Geleneksel bağlayıcı elemanlar; alçı, kil, hava kireci, sonralarda üretilen hidrolik kireçler ve erken çimentolardır. Erken çimentoların bazıları günümüzde hala kullanılan portland çimentosunun ilklerindendir. 20. Yüzyılın başlarında bağlayıcı harçların yanı sıra, çimento katkılı harçlar ve kireç takviyeli çimento harçlarının da kullanıldığı görülmektedir [11].

IV. SAHA ÇALIŞMASI

A. Muradiye Mengencik Köyü 1 Numaralı Geleneksel Konut (MGK1)

MGK1, geleneksel mimaride yaygın biçimde kullanımı görülen ahşap iskelet ve tuğla dolgu tekniği ile inşa edilmiş bir geleneksel konuttur. İskelette ve dolguda kayıplar olduğu görülürken çevresel etkenlerden kaynaklı olduğu düşünülen yüzey aşınmaları meydana geldiği gözlenmiştir. Ahşap elemanlardaki yer yer gözlenen kayıplar ve çürümeler, dolgu tuğla sistemde gözlenen ayrışmalar konutun strüktürel bağlamda bütüncüllüğünü olumsuz anlamda etkilemektedir.



Şekil 3. MGK1

B. Muradiye Mengencik Köyü 2 Numaralı Geleneksel Konut (MGK2)

MGK2, ahşap iskelet ve dolgu tuğla tekniğin kullanımıyla inşa edilmiş bir geleneksel konuttur ve örneklerine göre iyi korunmuş bir yapıdır. Konut cephesinden bakıldığında açıkça belli olan iskelet sistem, yapının yüklere karşı dayanıklı olduğunu ve strüktürel açıdan dengede olduğunu göstermektedir. Yapı incelendiğinde bakımlarının yapıldığı, tuğla dolgu sistemin ve çatı sisteminin bütünlüğünü koruduğu ve işlevini halen daha yerine getirdiği gözlenmiştir. Ahşap sistem elemanlarında yer yer aşınmalar bulunmaktadır fakat bu durum strüktürel açıdan bir tehdit olarak görülmemektedir. Yapının küçük müdahalelerle korunabilmesi mümkün görünmektedir ve konut gelenekselin günümüze ulaştığı iyi örneklerden birini teşkil etmektedir.



Şekil 4. MGK2

C. Büyükaçma Köyü 1 Numaralı Geleneksel Konut (BGK1)

BGK1; ahşap iskelet sistem ve tuğla dolgu teknik ile inşası yapılmıştır fakat yapıya sonradan eklenen ve günümüzde kullanılan yapı malzemeleri ile inşa edildiği görülen yapı ile beraber düşünüldüğünde karma bir yapı kimliğine sahip olduğu görülmektedir. Özgün yapıya bakıldığında iskelette ve dolguda herhangi bir kayıp görülmezken çevresel etkenlerden kaynaklı olduğu düşünülen yüzey aşınmaları olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. BGK1

D. Büyükaçma Köyü 2 Numaralı Geleneksel Konut (BGK2)

BGK2; ahşap iskelet sistem ve tuğla dolgu sistem ile inşa edilmiş bir geleneksel konuttur. Çatı malzemesinin günümüzde kullanılan metal bir malzemeyle değiştirildiği gözlemlenmektedir. Cephede birbirinden farklı yapım teknikleri görülmektedir. Özgün yapıya bakıldığında iskelette ve dolguda herhangi bir kayıp olmadığını ancak çevresel etkenlerden kaynaklı olduğu düşünülen yüzey aşınmaları meydana geldiği görülmüştür. Strüktürel sistemin korunmuş olması konutun restore edilerek kendi kimliğine dönebilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. BGK2

E. Ovapınar Köyü 1 Numaralı Geleneksel Konut (OGK1)

OGK1; ahşap iskelet ve kerpiç dolgu malzemesiyle inşa edilen hımış sistem bir geleneksel konuttur. Taşıyıcı görevini üstlenen ahşap yapı elemanlarının halen daha işlevini yerine getirdiği gözlenirken bakımsızlıktan ve doğal tahribattan kaynaklı olduğu düşünülen dolgu görevini yerine getiren kerpiç yapı

malzemesinde yer yer aşınmalar ve kayıplar meydana geldiği gözlenmiştir. Çatı sisteminin yapıyı hala koruyabildiği görülürken doğrama ve pencerelerdeki tahribat seviyesi ve cephede açık bir şekilde görülen bitkilenme konutun uzun zamandır işlevini yerine getirmediğini göstermektedir. Yapıya bütüncül bakıldığında geleneksel kimliğini halen daha korumaktadır fakat ileri seviyede yıpranmıştır ve kimliğine uygun onarım ya da koruma müdahaleleri gerektirmektedir.



Şekil 7. OGK1

F. Ovapınar Köyü 2 Numaralı Geleneksel Konut (OGK2)

OGK2; ahşap iskelet sistem ve tuğla dolgu teknik ile inşa edilmiş ve büyük oranda korunmuş bir geleneksel konut örneğidir. Alt kata sıva uygulaması yapılmış olsa da üst kata bakıldığında taşıyıcı sistem net bir şekilde görülmektedir ve bu da konutun geleneksel kimliğini hala koruyabildiğini göstermektedir. Bütüncül bakıldığında bazı cephelere uygulanan gazbeton bloklar ve sıva uygulaması olduğu görülmektedir. Genel olarak konut iyi durumda gözükmektedir ve uygun restore teknikleri ile geleneksel karakterini hem koruyup hem de sürdürebileceğini göstermektedir.



Şekil 8. OGK2

V. SONUÇLAR

Çalışma incelemesi yapılan altı geleneksel konutun; kullanım şartları, inşa edildikleri teknikler ve yapı inşa edilirken kullanılan yapı malzemelerine bağlı olarak farklı çeşitlerde ve seviyelerde bozulma ve evrilme yaşadıklarını göstermektedir. Genellikle ahşap iskelet sistem ve tuğla dolgu tekniği ya da kerpiç dolgu tekniğin kullanılarak oluşturulduğu yapıların zamanla farklı bakım ve kullanım şartları ve doğal faktörlere karşı farklı fiziksel tepkiler verdikleri gözlemlenmiştir. Bakımsız bırakılan ve uzun yıllar kullanılmayan konutlarda biyolojik bozulmalar ve taşıyıcı elemanlardaki aşınma ve kayıplar ileri seviyelerde performans kayıpları meydana getirmiş birkaç örnekte ise yok olma seviyesine kadar gelip bu sürece girdikleri görülmüştür. Buna bağlı olarak çalışmada incelenen birçok kontun ahşap iskelet sistem ve tuğla dolgu

teknik ile inşa edildiği tespit edilmiştir. Her bir konutta; kullanıldığı yapı malzemesine, yapım tekniğine ve kullanım şartlarına bağlı olarak çevresel etkenlere karşı farklı fiziksel durumlar gözlenmiştir. Bu yapılar geleneksel kimliğin ve tekniğin korunabilmesi ve kültürel mirasın korunarak sürdürülebilmesi açısından önemli örnekler olarak değerlendirilmektedir.

VI. TARTIŞMA

İncelemesi yapılan geleneksel konutlar, ahşap iskelet ve tuğla/kerpiç dolgu tekniğiyle yapılan hımış sistemin sağlamlığını, konuta karşı kullanıcı müdahelelerine ve bakım seviyesinin hangi düzeyde yapıldığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Düzenli bir şekilde bakımları yapılan konutların iskelet sisteminin hala daha strüktürel görevini yerine getirip korunduğunu, ancak bakımları ihmal edilen ve terkedilmiş konutların malzemelerinde aşınma ve kayıplar ve biyolojik bozulmalar gibi çeşitli sorunlar yaşadığını ve bu yapılarda yokoluş sürecinin hızlı bir şekilde ilerlediği görülmüştür. Bu çalışma geleneksel yapıların; kullanılan yapı malzemesi, yapım tekniği ve maruz kaldığı çevresel etkenler ile bütüncül bir şekilde düşünülmesi gerektiği fikrini ortaya koymaktadır. Bu sayede gelecekte yapılacak restorasyon çalışmalarında yapı bir bütün olarak değerlendirilebilecektir.

VII. ÇIKARIM

Bu çalışma çerçevesinde incelemesi yapılmış olan geleneksel konutlar; korunma ve sürdürülebilme durumlarının direkt olarak kullanış biçimine, müdahale tekniklerine ve gördükleri bakıma bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Ahşap iskelet sistemin doğru koşullarda sağlamlığını sürdürebildiğini fakat ilgisiz kaldıklarında hızlıca farklı çeşitlerde ve seviyelerde bozulma süreçlerine girdikleri belirlenmiştir. Çoğunlukla terk edilmeye bırakılmış konutlarda doğal faktörler ve biyolojik etkenler, yapının taşıyıcı sistemine olumsuz etki ederek strüktürel görevini yerine getirememesine sebep olmakla beraber yapının sistemsel bütünlüğünü de olumsuz yönde etkilemektedir. Bunlara bağlı olarak geleneksel bir yapının korunabilmesi için seçilen malzemenin uyumu, yapıya bilinçli müdahaleler ve bakım kavramlarının beraber ele alınarak koruma yollarına gidilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde katkısı ve desteği olan Beyköy Belediyesine teşekkürlerimizi iletiyoruz.

KAYNAKLAR

[1] Sabuncu, B., ve Sallı Bideci, Ö. (2022). Tarihi yapılarda kullanılan tuğla ve harçların mühendislik özelliklerine genel bir bakış. Selçuk 6. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi (ss.156-167), Konya, Türkiye.

[2] Akbaş, G. (2015). *Geleneksel yapım teknikleri ve mekan ilişkisi: Uzungöl ve Taşkıran örnekleri* (Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara).

[3] Özgünler, M. (2017). Kırsal Sürdürülebilirlik Bağlamında Geleneksel Köy Evlerinde Kullanılan Toprak Esaslı Yapı Malzemelerinin İncelenmesi A Research on Vernacular Earth Based Materials for the Purpose of Sustaining Rural Architecture. Süleyman Demirel Üniversitesi Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi, 2(2), 33–41.

[4] (2022) website. (Online). Available; https://www.beykoy.bel.tr/

[5] Muşkara, Ü. (2017). Kırsal ölçekte geleneksel konut mimarisinin korunması: Özgünlük. *SEFAD*, (37), 437–448.

[6] Sezgin, H. (2006). Yöresel konut mimarisi ve Türkiye'deki örnekleri hakkında. Sayı 4, Mayıs 2006.

[7] Genç, G. (2025). Geleneksel Yapım Yöntemleri Işığında Sürdürülebilir Yenilikçi Yapı Malzemelerinin Analizi. *İdealkent*, *17*(47), 62-88. https://doi.org/10.31198/idealkent.1574959

[8] Acun Özgünler, S., & Gürdal, E. (2012). Dünden Bugüne Toprak Yapı Malzemesi: Kerpiç. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, *9*, 29-37. https://izlik.org/JA49DF52GM

[9] Saydamer, A. (2014). Türkiye'deki geleneksel ahşap yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemlerin irdelenmesi ve Bursa örneği (Yüksek lisans tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[10] Era, A. C. (2013). Geleneksel Harman Tuğlası Ve Üretimi. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, *2*(2). https://izlik.org/JA46XA54YT

[11] T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü & İstanbul Büyükşehir Belediyesi KUDEB Müdürlüğü. (2011). Geleneksel harçlar ve koruma harçları: Bağlayıcı olarak kullanılacak kireç ve hidrolik kireçli, puzzolanlı, tuğla tozlu ve tuğla kırıklı harçlardaki malzeme oranlarının belirlenmesi çalışması raporu.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Eklemeli İmalatla Üretilmiş Bakır Elektrotların Elektro Erozyon İşleminde Aşınma Hızlarının İncelenmesi

İlker Eroğlu[a], Ali Kalyon[b]*

[a]Yalova Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yalova/Türkiye.
[b]Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: ilkereroglu3@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen CuCr1Zr bakır elektrotların elektro erozyon ile işleme (EEİ) performansları, geleneksel yöntemlerle üretilen elektrotlar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İş parçası olarak yüksek tokluğa sahip KEYLOS 40 EVO kalıp çeliği kullanılmıştır. Deneyler 3 A, 6 A ve 9 A akım şiddetlerinde ve 100, 200, 300 µs vurum sürelerinde gerçekleştirilmiş, sabit 30 dakika işleme süresi sonunda elektrot aşınmaları ölçülerek aşınma hızları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, eklemeli imalat ile üretilen elektrotların tüm parametre kombinasyonlarında geleneksel elektrotlara kıyasla belirgin şekilde daha yüksek aşınma sergilediğini göstermiştir. Özellikle yüksek akım ve düşük vurum süresi koşullarında (9 A – 100 µs), eklemeli imalat elektrotlarında maksimum aşınma hızı 19,60 mg/dak olarak ölçülürken, aynı koşullarda geleneksel elektrotlarda bu değer 3,70 mg/dak olarak belirlenmiştir. Akım şiddetinin artması elektrot aşınmasını önemli ölçüde artırırken, vurum süresinin artışı genel olarak aşınma hızında azalma eğilimi oluşturmuştur. Sonuçlar, eklemeli imalat elektrotların mikro yapısal özellikleri ve olası porozite içeriği nedeniyle EEİ sürecinde daha düşük aşınma direnci gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, karmaşık geometrilerin üretilebilirliği açısından eklemeli imalat önemli avantajlar sunmakta olup, proses parametrelerinin optimize edilmesi ile performansın iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Bakır elektrot, Eklemeli imalat, Elektro erozyon işleme (EEİ), Elektrot aşınması, Takım çeliği.*

Investigation of Wear Rates of Copper Electrodes Produced by Additive Manufacturing in Electrical Discharge Machining Process

İlker Eroğlu[a], Ali Kalyon[b]*

[a]Yalova University, Institute of Graduate Studies, Department of Mechanical Engineering, Yalova/Türkiye.
[b]Yalova University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Yalova/Türkiye.
* Corresponding Author: ilkereroglu3@gmail.com

ABSTRACT

This study investigates the electrical discharge machining (EDM) performance of CuCr1Zr copper electrodes produced via additive manufacturing, in comparison with conventionally manufactured electrodes. A high-toughness KEYLOS 40 EVO tool steel was used as the workpiece material. Experiments were conducted at current levels of 3 A, 6 A, and 9 A, and pulse durations of 100, 200, and 300 µs. Electrode wear was measured after a constant machining time of 30 minutes, and wear rates were subsequently calculated. The results indicate that electrodes produced by additive manufacturing exhibit significantly higher wear compared to conventional electrodes across all parameter combinations. In particular, under high current and low pulse duration conditions (9 A – 100 µs), the maximum wear rate for additively manufactured electrodes was measured as 19.60 mg/min, whereas it was 3.70 mg/min for conventional electrodes under the same conditions. Increasing current intensity substantially increased electrode wear, while increasing pulse duration generally led to a decrease in wear rate. These findings suggest that the microstructural characteristics and potential porosity of additively manufactured electrodes contribute to

their lower wear resistance in the EDM process. Nevertheless, additive manufacturing offers significant advantages in terms of producing complex geometries, and it is anticipated that performance can be improved through process parameter optimization.

Keywords: *Additive manufacturing, Copper electrode, Electrical discharge machining (EDM), Electrode wear, Tool steel.*

I. GİRİŞ

Günümüz kalıpçılık endüstrisinde, yüksek sertliğe sahip alaşımlı çeliklerin işlenmesinde Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ), takım aşınması ve kesme kuvveti olmaksızın talaş kaldırması nedeniyle vazgeçilmez bir yöntemdir [1], [2]. Ancak işlenecek kalıp kavitesinin negatif kopyası olan bakır veya grafit elektrotların geleneksel CNC tezgahlarında talaşlı imalatla üretilmesi, karmaşık geometrilerde takım kırılması ve malzeme israfı gibi yüksek maliyetli dezavantajlar yaratmaktadır.

Takım çeliklerinin (D2, H13, KEYLOS) elektro erozyon ile işlenmesinde, yüksek takım aşınması literatürde hala çözülmesi gereken temel problemlerin başında gelmektedir. Rafaqat ve ark. [3] ve Younis ve ark. [4] tarafından yapılan çalışmalarda elektrot malzemesinin aşınma davranışı üzerinde kritik role sahip olduğu vurgulanmıştır. Benzer şekilde Mohammad ve ark. [5] da yeni nesil çok malzemeli elektrot kaplamalarının EEİ performansını optimize etmedeki başarısını ortaya koymuştur. Bu sorunları aşmak, malzeme israfını önlemek ve özellikle içten soğutma (conformal cooling) kanallarına sahip yekpare tasarımlar üretebilmek için eklemeli imalat modern bir çözüm sunmaktadır [6].

Buna karşın, bakır alaşımlarının lazer yansıtıcılığı, eklemeli imalat sürecinde eriyik havuzu kararsızlıklarına ve mikro-gözeneklilik (porozite) kusurlarına yol açabilmektedir [7], [8]. Literatürde SLM yöntemiyle üretilmiş CuCr1Zr elektrotların fiziksel özellikleri incelenmiş olsa da [9], [10], takım çeliği işlenmesindeki takım aşınma karakteristikleri detaylandırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, KEYLOS 40 EVO kalıp çeliği işlenirken, geleneksel ve eklemeli imalat (SLM) yöntemiyle üretilmiş CuCr1Zr elektrotların aşınma hızlarını (EAH) karşılaştırmalı, istatistiksel ve mikroyapısal olarak incelemektir.

II. MATERYAL METOT

Çalışmada iş parçası olarak; kalıpçılık endüstrisinde sıklıkla tercih edilen, 360-400 HBW yüzey sertliğine, 1200 MPa çekme dayanımına ve 34.5 W/mK termal iletkenliğe sahip ön sertleştirilmiş KEYLOS 40 EVO [11] alaşımlı takım çeliği kullanılmıştır. Karşılaştırma grubunu oluşturan geleneksel elektrotların malzemesi olarak, yüksek termal iletkenliği (320 W/mK) ile öne çıkan ve ısıl işlem görmüş formda 135-170 HBW sertliğe sahip ticari CuCr1Zr alaşımı [12] seçilmiştir.

Deneylerde kullanılacak tüm elektrotlar Ø12 x 15 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Bu kapsamda geleneksel elektrotlar söz konusu ticari kütük çubuklardan talaşlı imalatla boyutlandırılırken; eklemeli imalat numuneleri aynı alaşımın (CuCr1Zr) tozları kullanılarak EOS M290 metal 3B yazıcıda Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle 40 µm katman kalınlığında üretilmiştir. Mitech MH100 cihazıyla yapılan ölçümler sonucunda, LPBF elektrotların ortalama sertliği 41,35 HRB (≈80-95 HBW) olarak belirlenmiş ve bu değerin geleneksel elektrotların sertlik seviyesinin (135-170 HBW) belirgin şekilde altında kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan EDM cihazı.



Şekil 2. EEİ deney düzeneği, İş parçası ve CuCr1Zr elektrotlar.

EEİ deneyleri, CoPower E4 CNC dalma erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda işleme süres 30 dakika, takım polaritesi + ve dielektrik ortam sıvısı olarak gaz yağı kullanılmıştır.Deney tasarımında minimum deneyle maksimum veriyi elde etmek için Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılmış [13]; 3 farklı boşalım akımı (3, 6, 9 A), 3 farklı vurum süresi (100, 200, 300 µs) ve 2 farklı elektrot tipi kontrol faktörü olarak atanmıştır. Elektrot aşınma hızı (EAH), 0,0001 g hassasiyetli analitik terazideki kütlesel kayıp ölçümlerinin işleme süresine oranlanmasıyla Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$EAH = \frac{W_i - W_f}{t} \times 1000 \quad (^{mg}/_{dak}) \tag{1}$$

Tablo 1. Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Parametreler (Kontrol Faktörleri)	**Seviye 1**	**Seviye 2**	**Seviye 3**
Elektrot Üretim Tipi	Geleneksel	Eklemeli İmalat	-
Boşalım Akımı (A)	3	6	9
Vurum Süresi (µs)	100	200	300

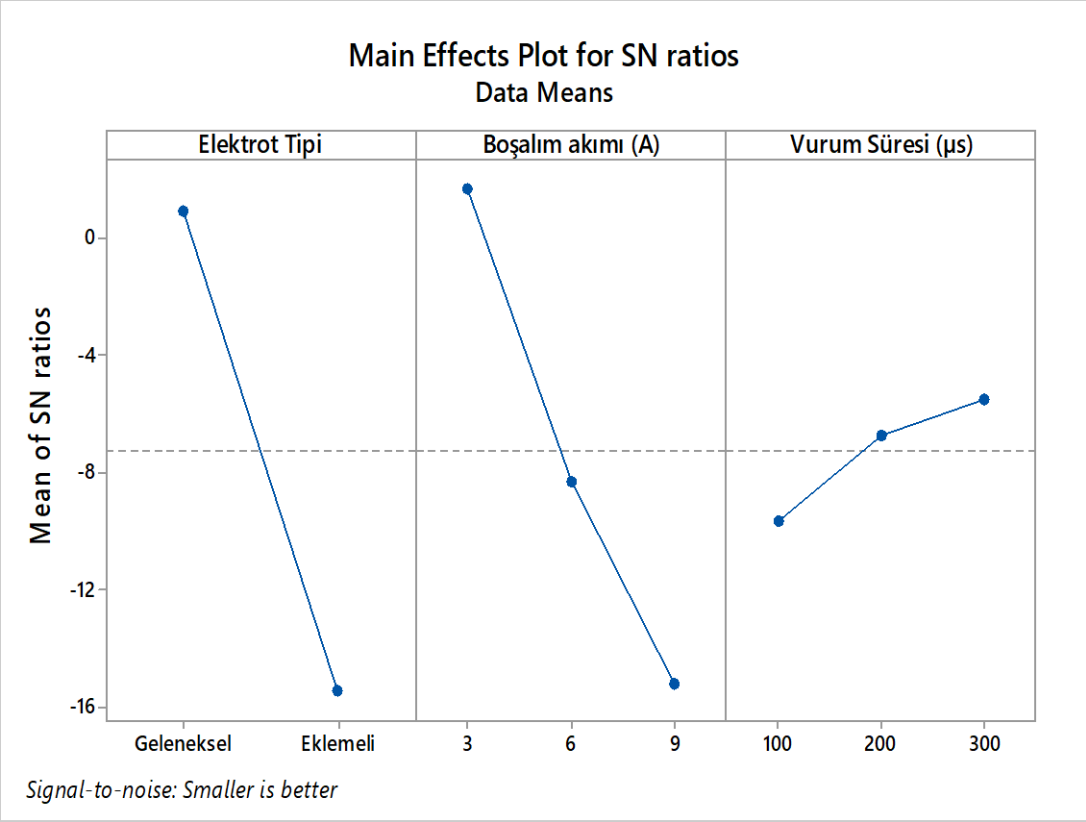
III. DENEYSEL SONUÇLAR

Elektrot aşınma oranlarındaki minimum değerlerin hedeflenmesi nedeniyle, Taguchi metodolojisinde "En Küçük-En İyidir" (Smaller-the-Better) kalite karakteristiği kullanılmıştır. Deneysel veriler ışığında, artan boşalım akımının her iki elektrot tipinde de aşınmayı arttırdığı gözlemlenmiştir. Aynı zorlu işleme koşullarında (9A - 100 µs) geleneksel elektrot 3.70 mg/dakika aşınırken, eklemeli imalat elektrotu 19.60 mg/dakika ile en yüksek aşınma hızına ulaşmıştır.

Tablo 2. L18 Ortogonal dizisine göre deneysel tasarım ve elektrot aşınma hızı (EAH) ölçüm sonuçları.

Deney No	**Elektrot Üretim Tipi**	**Boşalım Akımı (A)**	**Vurum Süresi (µs)**	**Elektrot Aşınma Hızı (EAH) (mg/dak)**
1	Geleneksel	3	100	0,18
2	Geleneksel	3	200	0,16
3	Geleneksel	3	300	0,13
4	Geleneksel	6	100	1,25
5	Geleneksel	6	200	1,10
6	Geleneksel	6	300	0,65
7	Geleneksel	9	100	3,70
8	Geleneksel	9	200	1,88
9	Geleneksel	9	300	1,52
10	Eklemeli İmalat	3	100	2,25
11	Eklemeli İmalat	3	200	1,61

12	Eklemeli İmalat	3	300	2,07
13	Eklemeli İmalat	6	100	7,81
14	Eklemeli İmalat	6	200	6,66
15	Eklemeli İmalat	6	300	6,79
16	Eklemeli İmalat	9	100	19,60
17	Eklemeli İmalat	9	200	14,28
18	Eklemeli İmalat	9	300	12,26



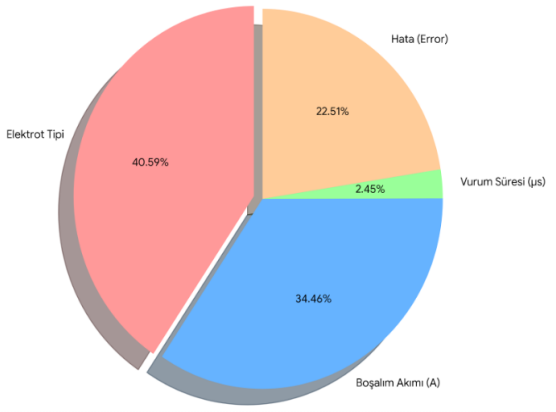
Şekil 3. Elektrot aşınma hızı (EAH) için kontrol faktörlerinin Sinyal/Gürültü (S/N) etki grafiği.

Minitab yazılımı üzerinden elde edilen S/N grafiğindeki (Şekil 3) eğimler incelendiğinde; eğimi en dik olan çizginin "Elektrot Tipi" olduğu, dolayısıyla sistemdeki en büyük sinyalin elektrot tipinden kaynaklandığı görülmektedir. Çizgilerin aşağı yönlü olması aşınmanın arttığını ifade etmektedir.

Sistemi bozan dış faktörleri ve parametrelerin istatistiksel güvenilirliğini ölçmek için uygulanan Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları, S/N grafiğindeki bulguları sayısal olarak kanıtlamıştır.

Tablo 3. Elektrot aşınma hızı (EAH) için ANOVA sonuçları ve % katkı oranları.

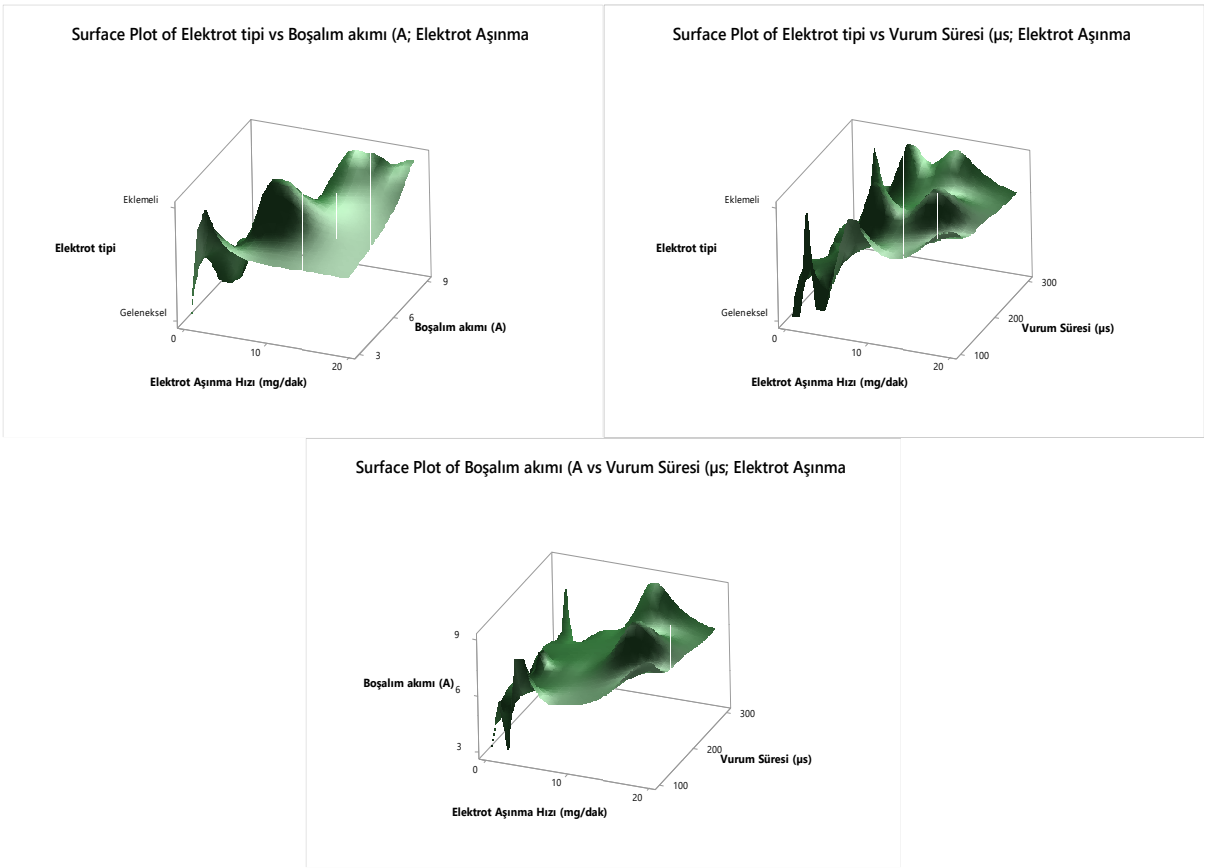
Varyans Kaynağı	**Serbestlik Derecesi (SD)**	**Düzeltilmiş Kareler Toplamı (KT)**	**Düzeltilmiş Kareler Ortalaması (KO)**	**F-Değeri**	**P-Değeri**	**Katkı Yüzdesi (PCR)**
Elektrot tipi	1	214,31	214,314	21,64	0,001	40,59%
Boşalım akımı (A)	2	181,93	90,964	9,18	0,004	34,46%
Vurum Süresi (µs)	2	12,92	6,46	0,65	0,538	2,45%
Hata	12	118,86	9,905	-	-	22,51%
Toplam	17	528,02	-	-	-	%100,01*



Şekil 4. Elektrot aşınma hızına etki eden faktörlerin ANOVA pasta grafiği dağılımı.

ANOVA pasta grafiğinde (Şekil 4) açıkça görüldüğü üzere, elektrot üretim yöntemi (Geleneksel vs Eklemeli) %40.59 gibi yüksek bir oranla aşınma üzerindeki en etkili aktör olmuştur. Bunu %34.46 etki oranı ile boşalım akımı takip etmiştir. %22.51 olarak tespit edilen "Hata Payı" (Error) ise, eklemeli imalat ile üretim sürecinin doğasındaki porozite dağılımının rastlantısallığını ve bunun yarattığı öngörülemez aşınma kararsızlığını istatistiksel olarak yansıtmaktadır.

Şekil 5'teki 3D etkileşim grafikleri, süreç parametrelerinin elektrot aşınma hızı (EAH) üzerindeki birleşik etkilerini özetlemektedir. Topografik analizler, en yoğun aşınma bölgelerinin zayıf termal iletim özelliğine sahip eklemeli imalat ile üretilen elektrotlar ile yüksek enerji yoğunluğuna sahip 9A akım şiddetinin birleştiği noktalarda kümelendiğini göstermektedir. Geleneksel elektrot kullanımında ise, özellikle düşük akım seviyelerinde aşınma oranları minimum düzeye inerek stabil bir seyir izlemektedir. Yüzey eğimlerindeki bu belirgin farklar, elektrot üretim teknolojisinin süreç üzerindeki baskın rolünü kanıtlarken; elde edilen görsel bulgular, Tablo 3'teki ANOVA verileri ve Şekil 4'teki katkı payı dağılımlarıyla tam bir korelasyon sergilemektedir.



Şekil 5. Akım, vurum süresi ve elektrot tipinin EAH üzerindeki etkileşimini gösteren 3D yüzey grafikleri.

Eklemeli imalat elektrotlarının geleneksel elektrotlara kıyasla 5 kata varan yüksek aşınma sergilemesinin temel nedeni, lazer katmanlı üretim doğası gereği yapıda oluşan mikroskobik gözeneklilik kusurlarıdır. Geleneksel elektrotta kıvılcım ısısı malzemeye hızla yayılırken, eklemeli yapıdaki gözenekler termal iletkenliği engelleyerek yüzeyde lokal aşırı ısınmalara yol açmıştır. Guu ve ark. [14] ile Swiercz ve ark. [15] tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulandığı üzere, yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerde boşalım akımının artması, plazma kanalının enerjisini büyüterek takım üzerindeki ısıl hasarı doğrudan tetiklemektedir. Flaño ve ark. [16] ile Li ve ark. [7] tarafından da belirtildiği gibi, bu lokal ısıl enerji birikimi, atomik seviyede normal bir ergime yerine bölgesel kütlesel parça kopmaları şeklinde çok daha şiddetli bir mikroyapısal aşınmaya neden olmuştur.

Tüm parametreler incelendiğinde, vurum süresinin (pulse-on time) 100 µs'den 300 µs'ye çıkmasıyla elektrot aşınmasında dikkate değer bir yavaşlama gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun süreli elektriksel deşarjlarda sabit sıvı olarak kullanılan gaz yağının (kerosen) termal olarak ayrışmasıyla açıklanmaktadır. Ayrışma sonucu açığa çıkan karbon partikülleri, elektrot yüzeyine sıvanarak koruyucu bir tabaka oluşturmuştur [1], [17]. Bu kurum tabakası, plazma kanalının elektrot yüzeyinde yarattığı ısıl hasarı sönümlemiş ve kütlesel kaybı azaltmıştır.

IV. SONUÇLAR

KEYLOS 40 EVO takım çeliğinin EEİ ile işlenmesinde, geleneksel ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş CuCr1Zr elektrotların aşınma performanslarının incelendiği bu çalışmada; elektrot üretim yönteminin aşınma hızı (EAH) üzerinde en dominant faktör olduğu ortaya konmuştur. Varyans Analizi (ANOVA) sonuçlarına göre %40.59 katkı oranıyla en belirleyici parametre olan üretim teknolojisi, eklemeli imalat elektrotlarında aşınma yönünden belirgin bir farklılık yaratmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen elektrotlar, mikroyapısal porozite ve düşük termal iletkenlik nedeniyle geleneksel kütük elektrotlara kıyasla tüm deneylerde daha fazla aşınma sergilemiştir. Bu elektrotlarda gözlemlenen aşırı kütlesel kayıplar, salt atomik ergimeden ziyade porozite kaynaklı lokal ısınmaların yol açtığı bölgesel parça kopmaları ile açıklanmaktadır.

Süreç parametrelerinin aşınma mekanizması üzerindeki etkileri ele alındığında ise, boşalım akımının 3A'den 9A seviyesine çıkarılmasının her iki elektrot tipinde de aşınma hızını doğrusal olarak artırdığı görülmüştür. En yüksek aşınma değeri (19.60 mg/dak), yüksek enerji yoğunluğunun oluştuğu 9A akım ve 100 µs vurum süresi kombinasyonunda kaydedilmiştir. Buna karşın, vurum süresinin 300 µs seviyelerine artırılması, dielektrik sıvının termal ayrışması sonucu elektrot yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşmasını sağlamıştır. Gözlemlenen bu mekanizma, özellikle yüksek akımlarda aşınma hızının bir miktar sönümlenmesine yardımcı olarak sürece stabilite kazandırmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde yürütülmüştür. Eklemeli imalat bakır elektrotların tedariğindeki destekleri için Sentes-Bir firmasına; tüm deneysel süreçlerde, ekipman tedariğinde ve test aşamalarında altyapı imkanı sağlayan Plascam firmasına ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

[1] K. H. Ho, S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 1287-1300, 2003.

[2] A. Kalyon, "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin elektro erozyon tekniği ile işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi," Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi, 3(1), 75-86, 2019.

[3] M. Rafaqat, N. A. Mufti, N. Ahmed, A. U. Rehman, A. Y. AlFaify, M. U. Farooq, M. Saleh, "Hole-Making in D2-Grade Steel Tool by Electric-Discharge Machining through Non-Conventional Electrodes," Processes, 10(8), 1553, 2022.

[4] M. A. Younis, M. S. Abbas, M. A. Gouda, F. H. Mahmoud, S. A. Abd Allah, "Effect of electrode material on electrical discharge machining of tool steel surface," Ain Shams Engineering Journal, 6(3), 977-986, 2015.

[5] S. Mohammad, M. W. Habib, A. Kanwal, M. Asim, M. Farooq, I. Zahid, N. S. Akbar, H. Togun, F. Riaz, "Performance optimization of D2 tool steel machining using novel multi-material cladded electrodes in electric discharge machining," Results in Engineering, 25, 103812, 2025.

[6] Q. Jiang, P. Zhang, Z. Yu, H. Shi, D. Wu, H. Yan, X. Ye, Q. Lu, Y. Tian, "A Review on Additive Manufacturing of Pure Copper," Coatings, 11(6), 740, 2021.

[7] S. Li, G. Fu, H. Li, Z. Ren, S. Li, H. Xiao, Q. Peng, "Effect of layer thickness on the melt pool behavior and pore defects evolution of selective laser melting CuCrZr alloy," Journal of Alloys and Compounds, 967, 171778, 2023.

[8] X. Tang, X. Chen, F. Sun, L. Li, P. Liu, H. Zhou, S. Fu, A. Li, "A study on the mechanical and electrical properties of high-strength CuCrZr alloy fabricated using laser powder bed fusion," Journal of Alloys and Compounds, 924, 166627, 2022.

[9] Z. Kuai, Z. Li, B. Liu, Y. Chen, S. Lu, P. Bai, "Effect of heat treatment on CuCrZr alloy fabricated by selective laser melting: microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism," Journal of Materials Research and Technology, 23, 2658-2671, 2023.

[10] M. P. G. Karthick, A. R. Annamalai, C. P. Mohanty, A. S. Chauhan, "Small hole fabrication through additively manufactured CuCr1Zr electrode during EDM of a novel Haynes 25 superalloy," Journal of Materials Research and Technology, 25, 1981-2000, 2023.

[11] Lucchini RS Group, "KEYLOS® 40 EVO Technical Datasheet," [Online]. Erişilebilir: https://lucchinirs.com/tool-steels/keylos-40/ [Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2026].
[12] Sağlam Metal, "CUPRO MAX (CuCr1Zr) Teknik Veri Sayfası," [Online]. Erişilebilir: https://www.saglammetal.com/tr/bakir/sert-bakir-alasimlari/cupro-max-cucrzr [Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2026].
[13] G. Taguchi, "Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes," Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986. [Online]. Erişilebilir: https://archive.org/details/introductiontoqu0000tagu/ [Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2026].
[14] Y. H. Guu, H. Hocheng, C. Y. Chou, C. S. Deng, "Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel," Materials Science and Engineering: A, 358(1-2), 37-43, 2003.
[15] R. Świercz, D. Oniszczuk-Świercz, "Experimental Investigation of Surface Layer Properties of High Thermal Conductivity Tool Steel after Electrical Discharge Machining," Metals, 7(12), 550, 2017.
[16] O. Flaño, I. Ayesta, B. Izquierdo, J. A. Sánchez, J. M. Ramos, "Experimental study on the influence of electrode geometry and electrode path on wear pattern in EDM," Procedia CIRP, 68, 405-410, 2018.
[17] K. Ishfaq, M. Asad, S. Anwar, C. I. Pruncu, M. Saleh, S. Ahmad, "A Comprehensive Analysis of the Effect of Graphene-Based Dielectric for Sustainable Electric Discharge Machining of Ti-6Al-4V," Materials, 14(1), 23, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Düz Bir Yüzeyde Taşınım Katsayısının Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi

Neslin Hasar Ocak[a*]

[a]Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** neslin.hasar@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, düz bir yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen taşınım kaynaklı ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Ele alınan modelde, yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve yüzey alanı değeri sabit kabul edilerek farklı taşınım katsayısı değerlerinin ısı transferi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Newton'un soğuma yasası esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu doğrultuda farklı taşınım katsayıları için yüzeyden gerçekleşen toplam ısı transferi ile birim yüzey alanı başına düşen ısı akısı değerleri belirlenmiştir. Çalışmada ele alınan taşınım katsayısı aralığı, doğal taşınıma yakın düşük değerlerden zorlanmış taşınıma karşılık gelen yüksek değerlere kadar geniş bir inceleme olanağı sunmuştur. Elde edilen bulgular tablo ve grafikler yardımıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Taşınım katsayısının 5–50 W/m^2K aralığında artmasıyla toplam ısı transferinin 950 W'tan 9500 W'a yükseldiği ve ısı akısının da aynı eğilim doğrultusunda arttığı belirlenmiştir. Ayrıca taşınım katsayısı ile ısı transferi arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu açık biçimde ortaya konulmuştur. Düşük taşınım katsayısı değerlerinin doğal taşınım koşullarını, yüksek katsayı değerlerinin ise zorlanmış taşınım koşullarını temsil ettiği görülmüştür. Sonuç olarak, taşınım katsayısının düz yüzeylerde ısı transfer performansı üzerindeki belirleyici etkisi modelleme yardımıyla ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Düz yüzey, Isı akısı, Newton'un soğuma yasası, Taşınım ile ısı transferi, Taşınım katsayısı*

Investigation of the Effect of the Convection Coefficient on Heat Transfer from a Flat Surface

ABSTRACT

In this study, convective heat transfer from a flat surface to the surrounding fluid was numerically investigated. In the considered model, the surface temperature, ambient temperature, and surface area were assumed to be constant, while the effect of different convection coefficient values on heat transfer was evaluated. Calculations were carried out based on Newton's law of cooling. Accordingly, the total heat transfer from the surface and the heat flux per unit surface area were determined for different convection coefficient values. The selected convection coefficient range provided a broad basis for analysis, extending from low values close to natural convection to high values corresponding to forced convection. The findings were comparatively evaluated using tables and graphs. It was determined that, as the convection coefficient increased from 5 to 50 W/m^2K, the total heat transfer rose from 950 W to 9500 W, and the heat flux also increased in the same manner. In addition, a linear relationship between the convection coefficient and heat transfer was clearly demonstrated. As a result, the determining effect of the convection coefficient on the heat transfer performance of flat surfaces was revealed through modeling.

Keywords: *Flat surface, Heat flux, Newton's law of cooling, Convective heat transfer, Convection coefficient*

I. GİRİŞ

Endüstriyel proseslerde çalışan ekipmanların yüzeylerinden çevre ortama gerçekleşen ısı transferi enerji kayıpları açısından önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek sıcaklığa sahip boru hatları, tank yüzeyleri, fırın duvarları ve çeşitli proses ekipmanlarında yüzey ile çevre akışkanı arasındaki taşınım mekanizması önemli miktarda ısı transferine neden olabilmektedir. Bu nedenle yüzeyden gerçekleşen ısı

transferinin anlaşılması ve bu süreci etkileyen parametrelerin belirlenmesi mühendislik uygulamaları açısından önem taşımaktadır [1, 2].

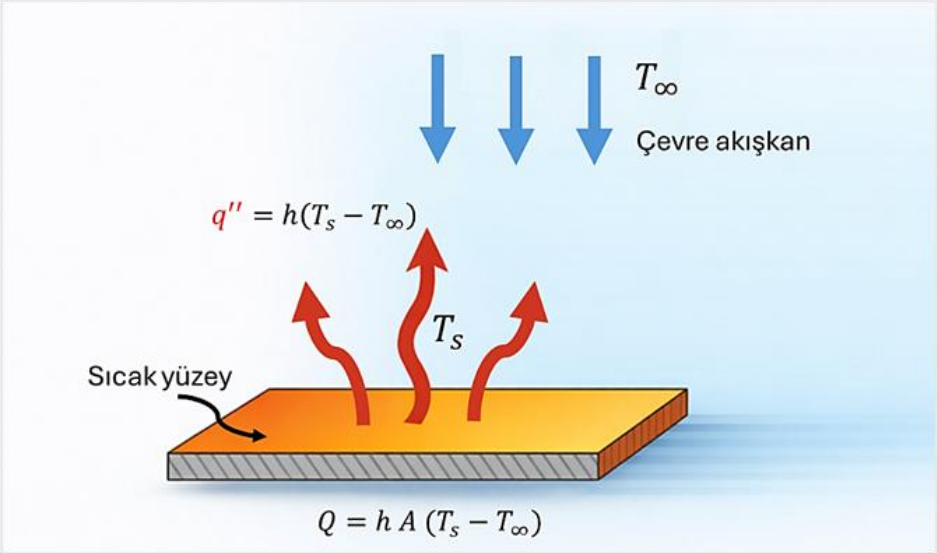
Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı, yüzey alanı ve taşınım katsayısı gibi parametrelere bağlıdır. Bu parametreler arasında taşınım katsayısı, akışkanın fiziksel özellikleri ve akış koşullarına bağlı olarak değişmekte ve ısı transfer miktarı üzerinde belirleyici bir etki oluşturmaktadır [3]. Doğal taşınım ve zorlanmış taşınım koşullarında farklı değerler alabilen bu katsayı, yüzeyden çevreye olan ısı geçişinin değerlendirilmesinde önemli bir büyüklüktür.

Literatürde, düz bir yüzey için sabit sınır koşulları altında taşınım katsayısının ısı transferi üzerindeki etkisini açık ve karşılaştırmalı biçimde ortaya koyan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir [4, 5]. Bu nedenle, taşınım katsayısının ısı transferi üzerindeki etkisinin basit bir model üzerinden incelenmesi yararlı görülmektedir.

Bu nedenle bu çalışmada, taşınım katsayısının düz bir yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı taşınım katsayısı değerleri için yapılan hesaplamalar ile bu katsayının ısı transferi üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve sonuçlar grafikler ile sunulmuştur. Ayrıca farklı taşınım katsayısı aralıklarına karşılık gelen taşınım koşulları dikkate alınarak, taşınım katsayısı arttıkça ısı transferinin doğrusal olarak arttığı gösterilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada düz bir yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen taşınım kaynaklı ısı transferi incelenmiştir. İncelenen sistem, sabit sıcaklığa sahip bir yüzey ile çevre akışkanı arasındaki taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini temsil etmektedir. Sistem sınırı, yüzey ile çevre akışkan arasındaki taşınım bölgesini kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. İncelenen sistemin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



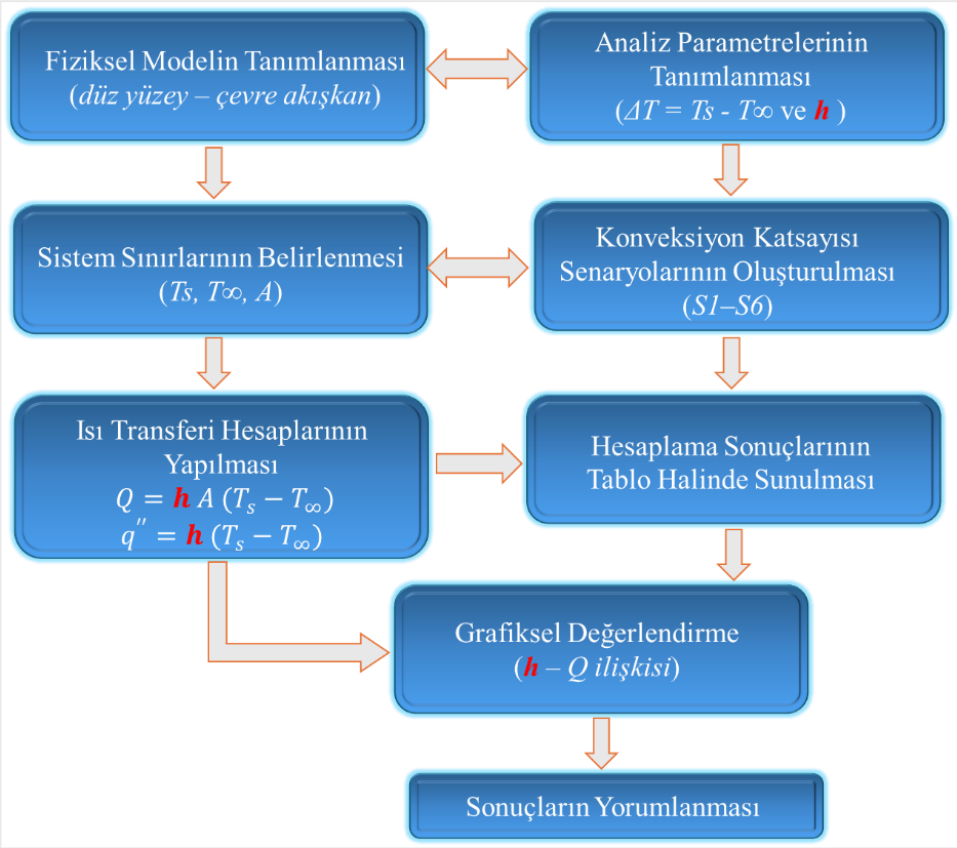
Şekil 1. Düz bir yüzeyden çevre akışkanına taşınım ile ısı transferinin şematik gösterimi.

Şekil 1'de görüldüğü gibi sıcak yüzeyden çevre akışkanına doğru gerçekleşen ısı transferi yüzey sıcaklığı T_s, ortam sıcaklığı T_∞, taşınım katsayısı h ve yüzey alanı A parametrelerine bağlıdır [6].

Analiz kapsamında aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Sistem kararlı rejimde çalışmaktadır.
- Yüzey sıcaklığı analiz süresince sabit ve homojen kabul edilmiştir.
- Isı transferinin yalnızca taşınım mekanizması ile gerçekleştiği varsayılmıştır.
- Yüzey alanı analiz süresince sabit kabul edilmiştir.
- Taşınım katsayısı her durum için sabit kabul edilmiştir.

Bu çalışmada izlenen hesaplama yaklaşımı beş temel adımdan oluşmaktadır. İlk olarak incelenen sistem için fiziksel model tanımlanmıştır. Daha sonra modelde kullanılacak temel değişkenler ve hesaplama koşulları belirlenmiştir. Üçüncü adımda, taşınım katsayısının etkisini incelemek amacıyla farklı karşılaştırma durumları oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, her bir durum için Newton'un soğuma yasası kullanılarak ısı transferi hesaplanmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada izlenen hesaplama yaklaşımının akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada izlenen hesaplama yaklaşımının akış diyagramı.

Şekil 2'de gösterilen süreç kapsamında her bir durum için yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen toplam ısı transferi ve birim yüzey alanı başına ısı akısı hesaplanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

A. Hesaplama Yaklaşımı

Bu çalışmada taşınım ile gerçekleşen ısı transferi Newton'un soğuma yasası kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkına ve taşınım katsayısına bağlı olarak gerçekleşen ısı transferini ifade etmektedir. Toplam ısı transfer hızı Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır [6]:

$$\dot{Q} = h\,A\,(T_s - T_\infty) \tag{1}$$

Burada;

$\dot{Q}$: yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen toplam ısı transfer hızı (W),
h: taşınım ısı transfer katsayısı (W/m^{2}K),
A: yüzey alanı (m^2),
T_s: yüzey sıcaklığı (°C),
T_∞: ortam sıcaklığı (°C).

Birim yüzey alanı başına gerçekleşen ısı transferi ise ısı akısı olarak ifade edilmekte olup aşağıdaki Eşitlik (2) ile hesaplanmaktadır [7]:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{2}$$

Burada q'', birim yüzey alanı başına gerçekleşen ısı akısını (W/m^2) temsil etmektedir.

B. Çalışmada Kullanılan Parametreler

Çalışmada kullanılan temel parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Yüzey alanı, yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı sabit kabul edilmiş ve bu değerlere bağlı olarak yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı hesaplanmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan sabit parametreler.

Parametre	Sembol	Değer	Birim	Açıklama
Yüzey alanı	A	2	m^2	Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı
Yüzey sıcaklığı	Ts	120	°C	Katı yüzeyin sıcaklığı
Ortam sıcaklığı	T∞	25	°C	Çevre akışkanının sıcaklığı
Sıcaklık farkı	ΔT	95	K	Yüzey ve ortam arasındaki sıcaklık farkı

Yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı $\Delta T = T_s - T_\infty$ eşitliği kullanılarak hesaplanmış ve $\Delta T = 95\,K$ olarak bulunmuştur.

C. Taşınım Katsayısı Değerleri

Taşınım katsayısı, yüzey ile akışkan arasındaki taşınım koşullarını temsil eden önemli bir parametredir ve akışkanın özellikleri, akış rejimi ve akış hızı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir [7]. Bu çalışmada taşınım katsayısının yüzeyden gerçekleşen ısı transferi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı değerler seçilmiştir.

Taşınım katsayısı değerleri, literatürde verilen tipik aralıklar dikkate alınarak seçilmiş ve doğal taşınıma yakın koşullardan zorlanmış taşınıma yakın koşullara kadar uzanan farklı karşılaştırma durumlarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. [7, 8]. İncelenen taşınım katsayısı değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Taşınım katsayısı değerleri ve temsil edilen taşınım koşulları.

Durum	h (W/m^2K)	Temsil edilen taşınım koşulu
S1	5	Düşük taşınım koşulları (doğal taşınıma yakın)
S2	10	Doğal taşınım koşulları
S3	15	Doğal taşınım – zorlanmış taşınım geçiş bölgesi
S4	20	Zorlanmış taşınım koşulları
S5	30	Zorlanmış taşınım koşulları
S6	50	Güçlü zorlanmış taşınım koşulları

Her bir durum için yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen toplam ısı transferi (Q) ve birim yüzey alanı başına ısı akısı (q'') hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

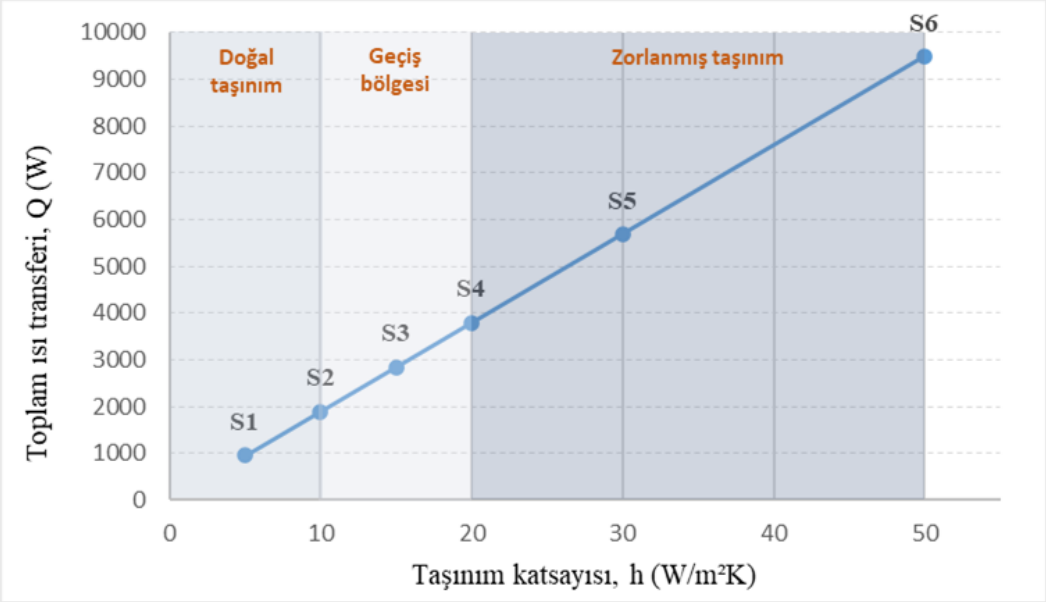
Bu çalışmada farklı taşınım katsayısı değerleri için yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen ısı transferi hesaplanmıştır. Her bir durum için elde edilen toplam ısı transferi değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Farklı taşınım katsayısı değerleri için hesaplanan ısı transferi sonuçları.

Durum	h (W/m^2K)	ΔT (K)	q'' (W/m^2)	Q (W)
S1	5	95	475	950
S2	10	95	950	1900
S3	15	95	1425	2850
S4	20	95	1900	3800
S5	30	95	2850	5700
S6	50	95	4750	9500

Tablo 3 incelendiğinde, taşınım katsayısındaki artışın ısı transferini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Taşınım katsayısının küçük değerlerinde ısı transferi sınırlı kalırken, katsayının artmasıyla birlikte ısı transferi doğrusal olarak artmaktadır.

Taşınım katsayısının ısı transferi üzerindeki etkisini daha açık ortaya koymak amacıyla hesaplanan sonuçlar grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı taşınım katsayısı aralıklarının temsil ettiği taşınım bölgeleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte kullanılan *S1–S6* noktaları, Tablo 2'de tanımlanan farklı taşınım katsayısı durumlarını temsil etmektedir. Taşınım katsayısı ile toplam ısı transferi arasındaki ilişki Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Taşınım katsayısına bağlı toplam ısı transferi değişimi ve taşınım bölgeleri.

Şekil 3 incelendiğinde, taşınım katsayısının artmasıyla birlikte toplam ısı transferinin doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Küçük taşınım katsayısı değerlerinin doğal taşınıma yakın koşulları, daha yüksek taşınım katsayısı değerlerinin ise zorlanmış taşınıma yakın koşulları temsil ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, taşınım katsayısı ile toplam ısı transferi arasındaki doğrusal ilişkinin Eşitlik (1) ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar, taşınım katsayısının ısı transferi üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle endüstriyel ekipman yüzeylerinde hava akımı, fan kullanımı veya akış hızındaki artış gibi etkenlerin ısı kaybını önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düz bir yüzeyden çevre akışkanına gerçekleşen taşınım ile ısı transferi incelenmiştir. Newton'un soğuma yasasına dayalı hesaplamalar kullanılarak taşınım katsayısının etkisi değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, taşınım katsayısındaki artışla birlikte toplam ısı transferinin doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Küçük taşınım katsayısı değerlerinin doğal taşınıma yakın, daha yüksek değerlerin ise zorlanmış taşınıma yakın koşulları temsil ettiği görülmüştür. Grafikler, taşınım katsayısı ile toplam ısı transferi arasında doğrusal bir ilişki bulunduğunu ve sonuçların Newton'un soğuma yasası ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, taşınım katsayısının ısı transferinin belirlenmesinde önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Bu parametre, yüzeyden gerçekleşen ısı kaybını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda hava akımı, fan kullanımı veya akış hızındaki değişim gibi etkenlerin ısı transferi üzerinde önemli etkiler oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda farklı yüzey alanları, sıcaklık farkları ve akış koşulları dikkate alınarak daha kapsamlı incelemeler yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] I. Qasim, A. Gunnarsson, F. Normann, B. Wilhelmsson, A. Zether, and K. Andersson, "Heat loss quantification and heat transfer in rotary kilns for calcination and clinker formation: From combustion and electrification at 150 kW to industrial scale," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 64, no. 23, pp. 11531–11543, 2025.

[2] X. Yuan, D. Zhao, Y. Hou, N. Yang, W. Ma, F. Chen, and G. Xie, "Study on the impact parameters of convective heat transfer in industrial-scale Siemens reactor," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 66, p. 105694, 2025.

[3] M. F. Amran, S. M. Sultan, and C. P. Tso, "Forced convective heat transfer in tubes and ducts: A review of Prandtl number, geometry, and orientation effects," Symmetry, vol. 17, no. 12, p. 2119, 2025.

[4] J. Zhao, J. Zhu, Y. Xu, and Y. Li, "New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients across the flat plate," Applied Thermal Engineering, vol. 258, p. 124688, 2025.

[5] P. Duda, “Heat transfer coefficient distribution—A review of calculation methods,” Energies, vol. 16, no. 9, p. 3683, 2023.
[6] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020.
[7] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
[8] J. P. Holman, Heat Transfer, 10th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Boron-Sülfon Bazlı Floresan Malzeme Sentezi ve OLED Uygulaması

Dilek Güç[a], Emine Tekin[b], Figen Türksoy[c]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Düzce/Türkiye.
[c]TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Kimya Teknolojisi Enstitüsü, p.b. 21, 41470, Gebze, Kocaeli, Türkiye.
*Sorumlu Yazar: gucdilek435@gmail.com

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında organik ışık yayan diyotlarda (OLED'ler) aktif katman olarak bor-sülfon bazlı organik moleküllerin potansiyelini araştırmak amaçlanmıştır. OLED'ler, iki elektrot arasına sıkıştırılmış çok sayıda organik malzeme katmanları içermektedir. En temelde organik katmanlar, bir delik taşıma katmanı, bir yayıcı katman ve bir elektron taşıma katmanından oluşmaktadır. Ayrıca aygıtta aktif tabaka dediğimiz bölgede kullanılan organik malzemelerin moleküler yapısı da emisyon renklerini ve verimliliklerini etkilemektedir. Temel amaç, bu cihazlardan yüksek kuantum verimliliği (EQE) elde etmek ve ekran teknolojisinde yenilikçi uygulamaların önünü açmaktır. Bu proje çalışmalarında, ışık yayıcı olarak bor-sülfon bazlı organik molekülleri kullanarak, cihaz performansını arttırarak yüksek fotolüminesans kuantum verimi ve mükemmel termal kararlılık gibi benzersiz özelliklerinden yararlanmak öngörülmüştür. Öncelikle bor-sülfon bazlı organik moleküllerin yapı-performans ilişkisinin kapsamlı bir araştırması yapılarak, fotofiziksel özelliklerini optimize etmek için değişen moleküler yapılara ve ikame edicilere sahip bir dizi yeni bileşiğin sentezlenmesini içerecektir. Ayrıca cihaz mühendisliği, OLED'lerin verimliliğinin en üst düzeye çıkarılmasında çok önemli bir rol oynayacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Bor-sülfon, Floresans, Organik Işık Yayan Diyotlar (OLED'ler).*

Boron-Sulphone Based Fluorescent Material Synthesis and OLED Application

Dilek Güç[a], Emine Tekin[b], Figen Türksoy[c]*

[a]Duzce University, Graduate Education Institute, Department of Chemistry, Duzce/Turkey.
[b]Duzce University, Faculty of Science and Literature, Department of Chemistry, Duzce/Turkey.
[c]TÜBİTAK Marmara Research Center, Institute of Chemical Technology, p.b. 21, 41470, Gebze, Kocaeli, Türkiye.
* **Corresponding Author:** gucdilek435@gmail.com

ABSTRACT

This study proposes the investigation of the potential of boron-sulfon-based organic molecules as active layers in fluorescent Organic Light Emitting Diodes (OLEDs). OLEDs are composed of multiple layers of organic materials sandwiched between two electrodes. Fundamentally, these organic layers consist of a hole transport layer, an emissive layer, and an electron transport layer. Moreover, the molecular structure of the organic materials used in the active region of the device significantly influences both the emission color and the efficiency. The main objective is to achieve high external quantum efficiency (EQE) from these devices and to pave the way for innovative applications in display technologies. In this project, it is envisioned to utilize boron-sulfon-based organic molecules as emissive materials, aiming to enhance device performance by leveraging their unique properties such as high photoluminescence quantum yield and excellent thermal stability. Initially, a comprehensive investigation of the structure–performance relationship of boron-sulfon-based organic molecules will be conducted. This will involve the synthesis of a series of new compounds with varying molecular structures and substituents to optimize their photophysical properties. Additionally, device engineering will play a crucial role in maximizing the efficiency of OLEDs.

Keywords: *Boron–sulfone, Fluorescence, Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs).*

I. GİRİŞ

Organik elektronik, son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel çevrelerin dikkatini çeken, hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Bu teknolojiler arasında öne çıkan Organik Işık Yayan Diyotlar (OLED'ler), esnek yapıları, düşük enerji tüketimleri ve yüksek çözünürlükleri sayesinde ekran teknolojileri ve aydınlatma sistemlerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [1]. OLED ekranlar, akıllı telefonlardan televizyonlara kadar birçok cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tıbbi teşhis için kullanılabilecek biyosensörler gibi algılama teknolojilerinde potansiyel uygulamalara sahiptir [2]. OLED'ler, elektron ve deliklerin bir yayıcı katmanda rekombinasyonu sonucu ışık yayımı gerçekleştiren, çok katmanlı organik yarı iletken aygıtlardır. Bu yayıcı katmanın içeriği ve yapısı, aygıtın verimliliğini ve ömrünü doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Yayıcı katmanda kullanılacak floresan malzemelerin tasarımı, OLED performansını artırmak amacıyla yürütülen çalışmalarda kilit rol oynamaktadır. Bu bağlamda, organik moleküllerin yapısal modifikasyonlarıyla optoelektronik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Son yıllarda, bor içeren heteroaromatik bileşikler, özellikle de bor-sülfon esaslı türevler, yüksek kuantum verimi, termal kararlılık ve geniş bant aralığı gibi üstün özelliklerinden dolayı OLED uygulamaları için dikkat çekici adaylar olarak öne çıkmıştır [3]. Bor atomu, üç değerli yapısıyla elektron eksikliği gösteren bir elementtir ve konjuge sistemlere entegre edildiğinde malzemenin elektronik yapısında önemli değişikliklere yol açar. Özellikle sülfon grupları ile birlikte kullanıldığında, molekülün dipol momenti artmakta, bu da hem çözücülere karşı çözünürlüğü hem de aygıt içindeki taşıma özelliklerini geliştirmektedir [4]. Bunun yanında, bor-sülfon yapıları, floresans verimliliğini artıran ve enerji seviyelerini kontrol etmede etkili olan elektronik etkiler sağlamaktadır [5].

II. MATERYAL METOT

A. Kullanılan Kimyasal Malzemeler

- Calciumhydrid, %95, Sigma-Aldrich
- (4-(tert-Butyl)phenyl) boronic acid, %99.66, BLDpharm
- Sodium carbonate anhydrous, Merck
- Tetrakis(triphenyl-phosphine)palladium(0), Aldrich
- N,N-Diisopropylethylamine, ≥ %99, Sigma-Aldrich
- Tris(dibenzyllideneacetone)dipalladium(0), %98.3, BLDpharm
- (9,9-Dimethyl-9H-xanthene-4,5-diyl)bis(diphenylphosphine), %98, BLDpharm
- Thiophenol, Merck
- 4-tert-Butylbenzenethiol, %99.84, BLDpharm
- 3-Chloroperbenzoic acid, ≤ %77, Sigma-Aldrich
- Sodium HydrogenCarbonate, Merck
- Tris(4-bromophenyl)amine, Aldrich
- Sodium sulfate anhydrous, Merck
- Silica gel 60, Merck
- Ethyl acetate, Carlo Erba
- n-Hexane, ≥ %95 Sigma-Aldrich
- Dichloromethane, ≥ %99, Fisher Chemical
- Toluene, ≥ %99.5, Sigma-Aldrich
- Tetrahydrofuran, ≥ %99.9, Riedel-de Haen
- Petroleum ether, Sigma-Aldrich
- Ethanol Absolute, ≥ %99.9, ISOLAB Chemical
- Methanol, Sigma-Aldrich
- Aseton, %99.75, Vitsan

B. Kullanılan Cihazlar

Sentezlenen bor-sülfon esaslı floresan bileşiklerin yapısal, optik, termal ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli karakterizasyon tekniklerinden yararlanılmıştır.

Bu analizler, elde edilen materyallerin hedeflenen yapıya sahip olup olmadığını ve OLED uygulamalarına uygun fiziksel-karakteristik özellikleri taşıyıp taşımadığını değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir [6].

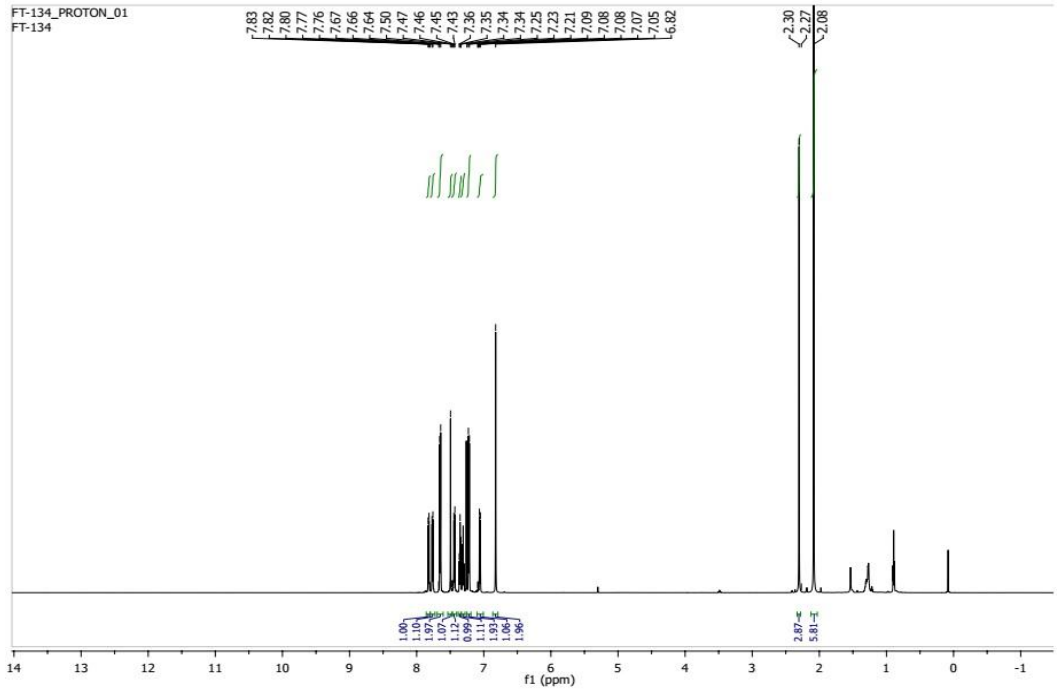
- Sentezlenen bileşiklerin kütle spektrumları BRUKER, MALDI-TOF-microflex ve LC-TOF-MICRO-TOF II cihazları ile alındı.
- 1H-NMR spektrumları Bruker-Spectrospin Avance DPX 500 MHz Spektrofotometresi ile alındı.
- Sentezlenen bileşiklerin dönüşümlü voltametrileri Gamry Instrument Referans 600 cihazı kullanılarak alındı.

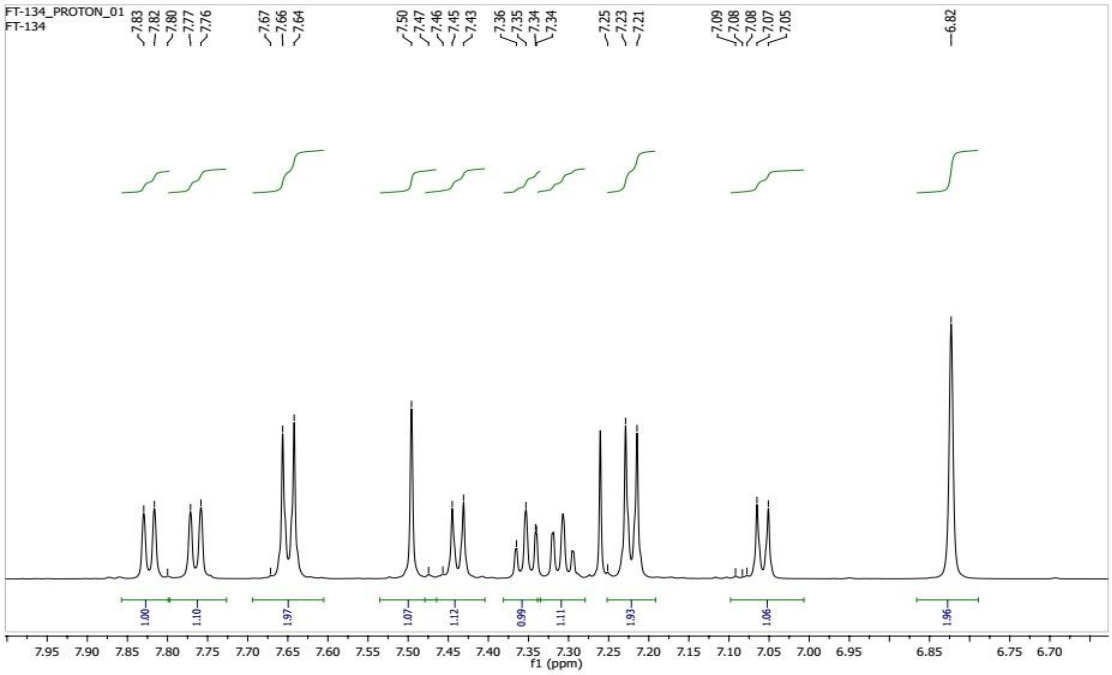
- Görünür bölge spektrumları Shimadzu UV-1650PC – UV-Vis Spektrofotometresi ile alındı.
- Sentezlenen bileşiklerin emisyon spektrumları VARIAN Cary Eclipse Fluoresans Spektrofotometresi ile alındı.
- FT-IR spektrumları Perkin Elmer Instruments, One Spektrofotometresi ile alındı.
- Sentezlenen bileşiklerin termal gravimetrik analiz termogramları Perkin Elmer Thermogravimetric Analyzer Pyris 1 TGA cihazı ile alındı.
- Sentezlenen bileşiklerin erime noktaları tayini Perker Elmer, Jade DSC cihazı ile yapıldı.

C. Sentez Yöntemi

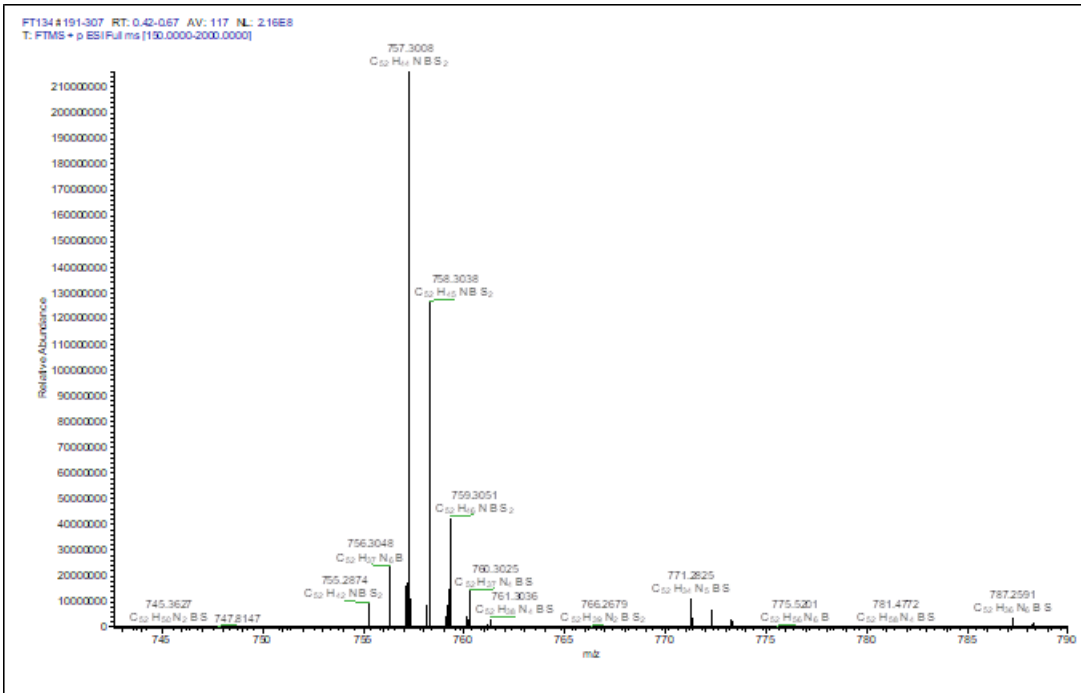
Bu çalışmada, OLED uygulamalarında aktif katmana olarak kullanılmak üzere bor–sülfon esaslı floresan organik moleküller tasarlanmış ve sentezlenmiştir. Sentez stratejisi, bor ve sülfür içeren fonksiyonel grupların çok halkalı aromatik bir çekirdek üzerine kontrollü ve rasyonel şekilde yerleştirilmesine dayanmaktadır. Amaç molekülün elektronik ve optik özelliklerini optimize ederek OLED uygulamalarına uygun yeni floresan materyaller geliştirmektir. Sentez sürecinin ilk aşamasında hedef molekülün öncül yapısı elde edilmiştir. Ardından seçici oksidasyon reaksiyonu uygulanarak tiyol grupları (–SH), sülfon türevlerine dönüştürülmüştür. Gerçekleştirilen bu yapısal dönüşüm ile molekül içerisindeki elektron dağılımının düzenlenmesi ve floresans özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bileşikler, sıvı–sıvı ekstraksiyon ve kolon kromatografisi yöntemleri kullanılarak yüksek saflıkta saflaştırılmıştır. Saflaştırılan ürünlerin yapısal karakterizasyonu ve optik özellikleri çeşitli spektroskopik analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Bu kapsamda FT-IR analizi ile moleküler yapı doğrulanırken, UV-Vis absorpsiyon ve floresans spektroskopisi ile optik davranışları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları doğrultusunda sentezlenen bor–sülfon esaslı moleküllerin uygun optik özellikler sergilediği ve OLED uygulamalarında potansiyel aktif emisyon materyali olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Bununla ilgili OLED aygıt ve karakterizasyon üretimi devam etmektedir.

D. Karakterizasyon Çalışmaları Sonuçları

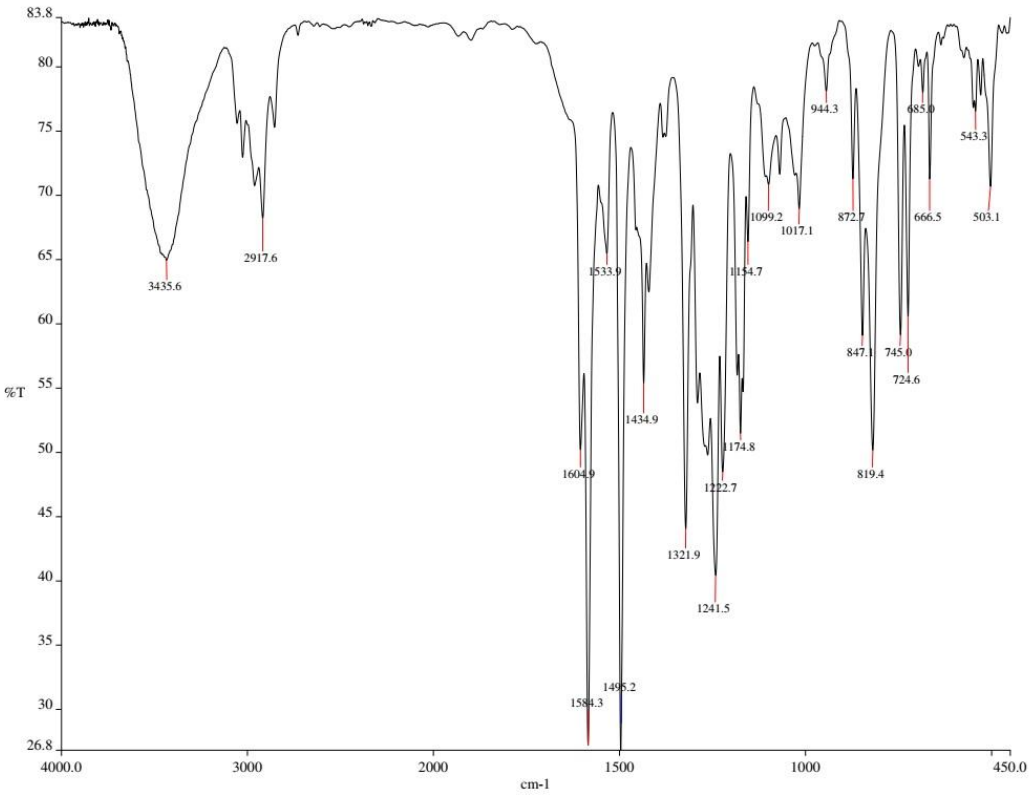




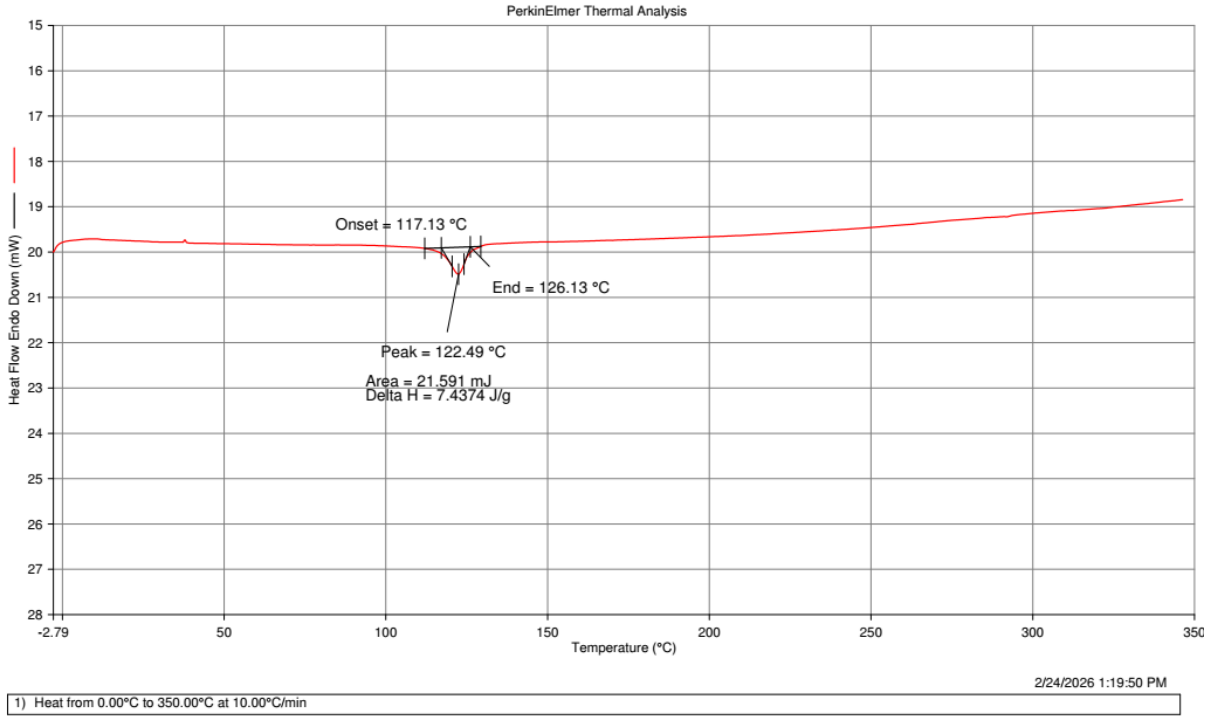
Şekil 1. **^{1}H-NMR Spektrumu (600 MHz, $CDCl_3$)** δ 7.83 (d, *J* = 6 Hz, 2H), 7.77 (d, *J* = 6 Hz, 2H), 7.65 (d, *J* = 12 Hz, 4H), 7.50 (s, 2H), 7.44 (d, *J* = 12 Hz, 2H), 7.36-7.34 (m, 2H), 7.32-7.29 (m, 2H), 7.22 (d, *J* = 12 Hz, 4H), 7.06 (d, *J*=12 Hz, 2H), 6.82 (s, 4H), 2.30 (s, 6H), 2.08(s, 12H)



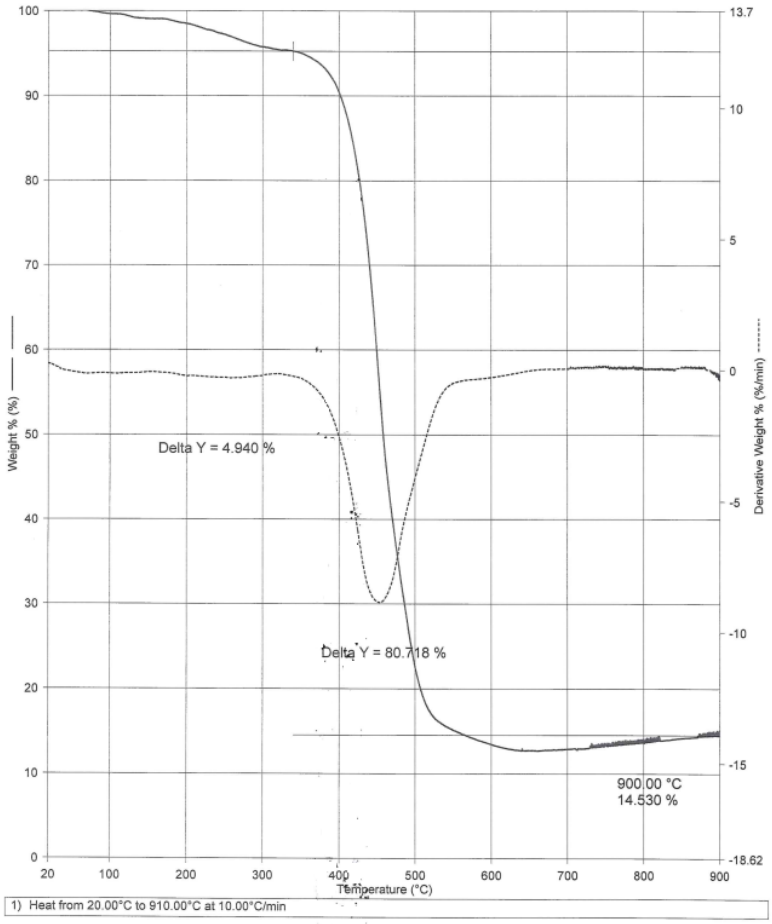
Şekil 2. **MALDI-TOF MS** m/z: $C_{52}H_{44}BNS_2$ calculated 757.8600, found 757.3008



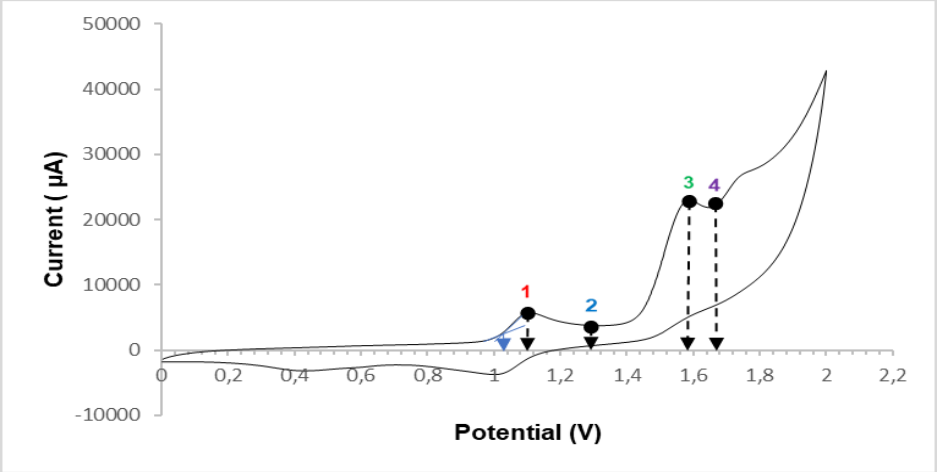
Şekil 3. **FTIR Spektrumu (KBr, cm^{-1}):** 3435, 2917, 1604, 1584, 1533, 1495, 1434,1321,1241, 1227, 1174, 1154, 1099, 1017, 944, 872, 847, 819, 745, 724, 685, 666, 543, 503



Şekil 4**. DSC (T_m) Kromotogramı** (Erime Noktası):122.49 ^{0}C.



Şekil 5. **TGA Termogramı (T_d)** (5%'lik ağırlık kaybı):340^{0}C



Şekil 6. **Dönüşümlü Voltametri (CV):** 1.03 V

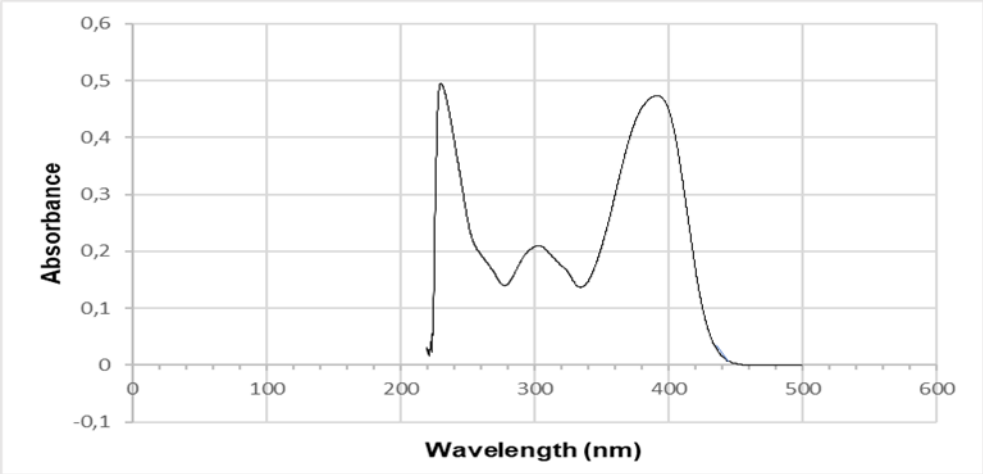
Hedef Molekül	E^{ox}_{onset} (V)[a]	λ^{abs}_{onset} (nm)[b]	E_g^{opt} (eV)[b]	HOMO (eV)[c]	LUMO (eV)[c]
4-(dimesitylboraneyl)-*N*,*N*-bis(4-phenylthio)phenyl)aniline (7) sentezi	1.03	454	2.72	-5.16	-2.44

[a] Ag/AgCl'ye karşı ölçülen başlangıç oksidasyon potansiyelleri, 0,1 M n-Bu_4NPF_6/Diklorometan çözeltisi içerisinde, platin (Pt) elektrot ile temas hâlindeyken alınan döngüsel voltamogramlarından elde edilmiştir; tarama hızı 100 mV/s'dir ve değerler ferrosene referans alınmıştır.

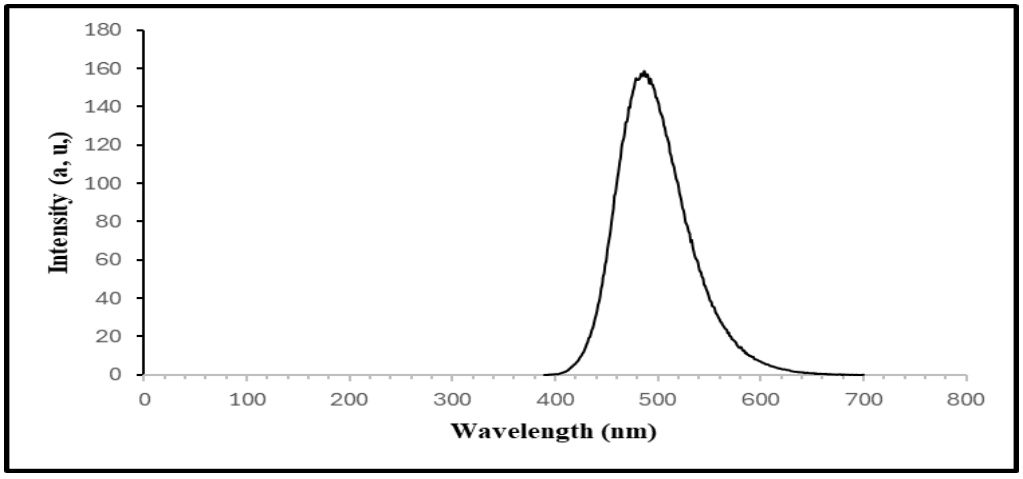
[b] Optik bant aralığı (Eg^{opt}), absorpsiyon spektrumunun başlangıç noktasının ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenmesiyle elde edilmiştir.
($E_g^{opt}=1240 / \lambda_{onset}$)

[c] HOMO ve LUMO düzeyleri aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$E_{HOMO} =[E_{ox} - E_{1/2}(ferrocene) + 4.8]$, $E_{LUMO} =E_{HOMO} - E_g^{opt}$



Şekil 7. (**Absornans λ^{abs} (nm):** 454 nm



Şekil 8. **Floresans Spektrometresi:** 486 nm

III. SONUÇLAR

Hedeflenen bileşik başarılı bir şekilde sentezlendi ve ^{1}H-NMR, MALDI-TOF-MS ve FT-IR analizleri ile karakterize edildi.

DSC ve TGA analizleri, dönüşümlü voltametri, UV-VIS soğurma spektroskopisi, floresans spektrometresi analizleri ile termal, elektrokimyasal ve fotofiziksel özellikleri incelenmiştir.

DSC analizi sonucunda, bileşiğn yaklaşık 117–126 °C sıcaklık aralığında endotermik bir geçiş gösterdiği belirlenmiştir. Eğride gözlenen 122.49 °C pik sıcaklığı, bileşiğin termal geçiş davranışını ortaya koymaktadır. Elde edilen ΔH değerinin 7.4374 J/g olması, yapının belirli bir enerji değişimi ile termal dönüşüm gerçekleştirdiğini göstermektedir.

TGA analizi sonucunda bileşiğin yüksek termal kararlılığa sahip olduğu belirlenmiştir. Eğride düşük sıcaklıklarda gözlenen sınırlı kütle kaybı, adsorbe çözücü veya nem uzaklaşmasına bağlanmıştır. Ana bozunma basamağının yaklaşık 400–500 °C aralığında gerçekleştiği ve bu bölgede belirgin kütle kaybının oluştuğu gözlenmiştir. 900 °C'de yaklaşık %14 kalıntı miktarının bulunması, sentezlenen yapının termal dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir.

Döngüsel voltametri sonuçları, bileşiğin çok kademeli oksidasyon davranışı gösterdiğini ve güçlü elektron verici karaktere sahip olduğunu ortaya koymuştur. UV-Vis analizinde ise 200–400 nm aralığında π–π* ve yük transfer bantları gözlenmiş, görünür bölgede düşük absorpsiyon belirlenmiştir.

Floresans emisyon spektrumu incelendiğinde, bileşiğin yaklaşık 480–500 nm aralığında maksimum emisyon verdiği görülmektedir. Elde edilen bu emisyon bandı, materyalin görünür bölgede güçlü floresans özelliği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Pik şiddetinin yüksek olması, sentezlenen bor–sülfon esaslı yapının etkin ışık yayımı gerçekleştirdiğini göstermektedir. Ayrıca emisyon bandının geniş yapıda olması, molekül içerisindeki π-konjugasyonun ve yük transfer etkileşimlerinin floresans davranışına katkı sağladığını düşündürmektedir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, sentezlenen bor–sülfon esaslı moleküllerin OLED uygulamaları açısından potansiyel taşıdığı belirlenmiştir. OLED aygıt üretimi ve cihaz karakterizasyon çalışmalarına ise devam edilmektedir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada sentezlenen bor–sülfon esaslı floresan molekülün yapısal, termal, elektrokimyasal ve fotofiziksel özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, OLED uygulamaları açısından dikkat çekici bir performans sergilediği görülmektedir. Özellikle FT-IR, ^{1}H-NMR ve MALDI-TOF-MS analizlerinden elde edilen veriler, hedeflenen moleküler yapının başarıyla sentezlendiğini doğrulamış ve sonraki karakterizasyon sonuçlarının güvenilirliğini desteklemiştir. Termal analiz sonuçları, sentezlenen yapının OLED gibi çalışma sırasında ısıl kararlılık gerektiren organik elektronik uygulamalarda kullanılabilecek düzeyde stabil olduğunu göstermektedir. DSC analizinde gözlenen endotermik geçiş, molekülün düzenli bir termal davranış sergilediğini ortaya koyarken, TGA analizinde bozunmanın yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi yapının güçlü termal dayanımını desteklemektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda dahi belirli miktarda kalıntı bırakması, aromatik ve konjuge yapının termal kararlılığa katkı sağladığını düşündürmektedir. Bu durum, literatürde OLED aktif materyalleri için aranan temel özelliklerden biri olan yüksek termal stabilite ile uyumludur. Elektrokimyasal analizlerde gözlenen çok kademeli oksidasyon davranışı, molekülün elektron verici karakterinin belirgin olduğunu göstermektedir. Bor ve sülfon gruplarının birlikte kullanılmasıyla oluşan donör–akseptör karakterli yapı, molekül içerisindeki yük transfer süreçlerini desteklemekte ve elektronik geçişlerin daha etkin gerçekleşmesine katkı sağlamaktadır. UV-Vis sonuçlarında belirlenen π–π* geçişleri ile yük transfer bantları da bu durumu doğrulamaktadır. Özellikle konjuge sistemin varlığı, optoelektronik özelliklerin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Floresans spektrumunda gözlenen güçlü emisyon davranışı ise sentezlenen molekülün ışık yayım kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Emisyon bandının görünür bölgede yer alması ve yüksek pik şiddeti, yapının OLED emisyon materyali olarak değerlendirilebileceğini düşündürmektedir. Ayrıca geniş emisyon bandı, molekül içerisindeki intramoleküler yük transfer etkileşimlerinin floresans davranışını etkilediğini göstermekte olup, bu özellik literatürde rapor edilen bor temelli floresan sistemlerle benzerlik göstermektedir. Sonuç olarak elde edilen tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, sentezlenen bor–sülfon esaslı molekülün yüksek termal dayanım, uygun elektronik özellikler ve güçlü floresans davranışı sayesinde OLED uygulamaları için umut verici bir aday materyal olduğu ortaya konmuştur. Devam eden aygıt üretim ve performans çalışmaları ile yapı–özellik ilişkilerinin daha ayrıntılı anlaşılması ve materyalin optoelektronik uygulamalardaki potansiyelinin netleştirilmesi hedeflenmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında bor–sülfon esaslı floresan bir molekül başarıyla sentezlenmiş ve yapısal karakterizasyon analizleri ile doğrulanmıştır. Termal analiz sonuçları, sentezlenen bileşiğin yüksek termal kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Elektrokimyasal ve UV-Vis analizleri, yapının etkin yük transfer özellikleri sergilediğini ortaya koyarken, floresans ölçümleri bileşiğin görünür bölgede güçlü emisyon verdiğini göstermiştir. Elde edilen tüm bulgular doğrultusunda, sentezlenen bor–sülfon esaslı yapının OLED uygulamalarında kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Proje sürecinde altyapı desteği sağlayan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Kimya Enstitüsü'ne ve 2024.05.03.1518 nolu proje için finansal destek sağlayan Düzce Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

[1] Tang, C. W., & VanSlyke, S. A. (1987). Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*, 51(12), 913–915. https://doi.org/10.1063/1.98799

[2] Wade, C. R., Broomsgrove, A. E. J., Aldridge, S., & Gabbai, F. P. (2010). Fluoride ion complexation and sensing using organoboron compounds. *Chemical Reviews*, 110(7), 3958–3984. https://doi.org/10.1021/cr900206p

[3] Yamaguchi, S., & Tamao, K. (1999). Organoboron compounds for optoelectronic materials. *Chemical Letters*, 28(11), 1063–1070. https://doi.org/10.1246/cl.1999.1063
[4] Liu, Z., Bai, M., & Wang, Y. (2015). Recent developments in boron-containing materials for OLEDs. *Materials Chemistry Frontiers*, 1, 1703–1728. https://doi.org/10.1039/C7QM00199J
[5] Jäkle, F. (2010). Advances in the synthesis and application of boron-containing π-conjugated materials. *Chemical Reviews*, 110(1), 398–418. https://doi.org/10.1021/cr900206p
[6] https://doi.org/10.1039/D6TC00262E

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Kentiçi Arterlerde Trafik Kaynaklı CO_2 Emisyonlarının LSTM Derin Öğrenme Modeli ve Sentetik Verilerle Tahmini

Mehmet Ali Silgu[a,b*]
[a]Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın/Türkiye.
[b]Koç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** masilgu@bartin.edu.tr

ÖZET

Motorlu taşıt kaynaklı karbon dioksit (CO_2) emisyonları, kentsel hava kalitesinin bozulmasına ve sera etkisinin artmasına yol açan başlıca etkenlerden biridir. Bu çalışmada, kentsel arteriyel yollardaki trafik hacmi ve ortalama araç hızına bağlı CO_2 emisyon oranlarını 5 dakikalık zaman adımları ve 30 dakikaya kadar uzanan tahmin ufkunda öngörmek amacıyla Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) tabanlı bir derin öğrenme modeli önerilmektedir. Model, araç hareket dinamiklerini ve COPERT metodolojisine dayalı emisyon faktörlerini birleştiren stokastik bir simülasyon çerçevesiyle üretilen sentetik bir veri kümesi üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Veri üretiminde serbest akış ve tıkanıklık rejimleri iki durumlu Markov zinciriyle modellenmiş; emisyon hesaplamalarında zirve ve zirve dışı dönemlere özgü araç filosu bileşimi gözetilmiştir. ARIMA, k-en yakın komşu regresyonu ve ileri beslemeli sinir ağıyla yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler, LSTM modelinin 15 dakikalık tahmin ufkunda 4,81 g/km/araç Ortalama Mutlak Hata ve 6,93 g/km/araç Kök Ortalama Kare Hata değerleri elde ettiğini ve tüm karşılaştırma modellerini yüzde 14 ile 31 arasında geride bıraktığını ortaya koymaktadır. Bulgular, önerilen yaklaşımın emisyon tahminli trafik yönetim sistemlerine ve çevre dostu rota planlama uygulamalarına entegre edilebilir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Akıllı ulaşım, Derin öğrenme, Kent içi trafik, LSTM.*

Estimation of Traffic-Related CO_2 Emissions on Urban Arterials Using LSTM Deep Learning and Synthetic Data

Mehmet Ali Silgu[a,b*]
[a]Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture, and Design, Bartın/Türkiye.
[b]Koç University, College of Engineering, Industrial Engineering, Istanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** masilgu@bartin.edu.tr

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO_2) emissions from motor vehicles represent a major contributor to urban air quality degradation and climate change. This study proposes a Long Short-Term Memory (LSTM)-based deep learning model for predicting traffic-related CO_2 emission rates on urban arterial roads at 5-minute intervals over forecast horizons up to 30 minutes. The model is trained and evaluated on a synthetically generated dataset that couples vehicle motion dynamics with COPERT-methodology-based emission factors under realistic urban driving conditions. Data generation employs a stochastic simulation framework in which free-flow and congested traffic regimes are governed by a two-state Markov chain, and emission computations account for peak and off-peak fleet compositions. Comparative experiments against ARIMA, k-nearest neighbours regression, and a feedforward neural network demonstrate that the LSTM achieves a Mean Absolute Error of 4.81 g/km/veh and a Root Mean Square Error of 6.93 g/km/veh at the 15-minute horizon, outperforming all baselines by 14–31%. The findings indicate that the proposed framework holds practical potential for integration into emission-aware traffic management systems and eco-routing applications.

Keywords: *Intelligent transportation, Deep learning, Urban traffic, LSTM.*

I. INTRODUCTİON

Road transport is responsible for about 24% of global energy-related CO_2 emissions and is among the fastest-growing sources of greenhouse gases in cities [1]. On urban arterial roads, traffic shifts constantly between free-flow and stop-and-go conditions. This back-and-forth creates large emission spikes that do not appear under steady-speed driving. For this reason, short-term prediction of traffic-related emissions is needed to support strategies such as adaptive signal control, eco-routing, and low-emission zone enforcement.

Most current methods estimate emissions from observed speed and volume data rather than forecasting future values. Statistical models such as ARIMA have been used for traffic flow prediction, but they assume linearity and stationarity, which limits their performance in congested urban conditions [2,3]. Machine learning approaches such as support vector regression and k-nearest neighbours handle non-linear relationships better, but they have difficulty capturing long-range time patterns such as those seen during morning and evening peak hours [9].

Long Short-Term Memory (LSTM) networks [4] are recurrent deep learning models designed for sequential prediction tasks. They use forget, input, and output gates to selectively keep or discard information over time. This makes them a good fit for urban traffic data, where conditions change frequently between free-flow and congestion. Several studies have used LSTM models for traffic flow and speed prediction with good results [5,6,10]. However, their use in joint traffic and emission forecasting has not been widely studied.

This study makes three contributions. First, a synthetic dataset is built by combining a two-state Markov traffic simulator with COPERT-based emission factors. This provides a reproducible benchmark for future research. Second, an LSTM model is developed that takes traffic speed, volume, and CO_2 emission rate as joint inputs and predicts future emissions. Third, the model is compared against ARIMA, k-NN, and FFNN baselines across multiple forecast horizons. Section 2 describes the data generation process and model setup. Section 3 presents the results. Section 4 provides conclusions.

II. METHODOLOGY

A. Synthetic Data Generation

A synthetic dataset was created to allow a controlled and fully reproducible experiment without depending on any proprietary traffic or emission data. The dataset is built from two modules: a traffic dynamics simulator and an emission computation module.

The traffic simulator generates speed and volume data for 30 virtual urban arterial segments over a 12-month period at 5-minute resolution. Two traffic states are modelled: free-flow (mean speed $\mu_1 = 58$ km/h, $\sigma_1 = 7$ km/h) and congested ($\mu_2 = 16$ km/h, $\sigma_2 = 5$ km/h). A time-inhomogeneous two-state Markov chain governs transitions between these states. Transition probabilities differ across four daily periods: morning peak (07:00–09:00), inter-peak (09:00–16:30), evening peak (16:30–19:30), and off-peak (19:30–07:00). These probabilities were calibrated based on published congestion patterns for medium-density European urban arterials [7]. Gaussian noise ($\sigma = 2.0$ km/h) is added to replicate sensor variability. Traffic volume is sampled from a Poisson distribution with a mean of 42 veh/5-min during peak periods and 18 veh/5-min off-peak.

The emission module converts simulated speed and volume into CO_2 emission rates in g/km/veh using COPERT 5 speed-dependent emission factor curves [8]. Fleet composition is adjusted by time of day. During morning and evening peaks, the fleet consists of 78% passenger cars and 15% light commercial vehicles. During inter-peak periods, heavy goods vehicles make up 12% of traffic, reflecting urban delivery patterns. Emissions are aggregated to 5-minute intervals, giving about 155,000 records per segment. A random 2.5% of values were removed and then replaced by linear interpolation. All speed and emission values were normalised to [0, 1] before training.

B. LSTM Model Architecture

The LSTM model takes a sequence of 12 consecutive 5-minute observations as input, covering a 60-minute look-back window. Each step includes traffic speed, traffic volume, and the CO_2 emission rate. The model outputs predictions at horizons of 5, 15, and 30 minutes. The network has two stacked LSTM layers with 64 and 32 units, followed by a dense output layer. Dropout regularisation with a rate of 0.20 is applied after each LSTM layer. Training uses the Adam optimizer with a learning rate of 0.001 and a batch size of 64, for up to 100 epochs. Early stopping is applied with a patience of 10 epochs based on validation MSE.

Data is split chronologically: 70% for training, 15% for validation, and 15% for testing.

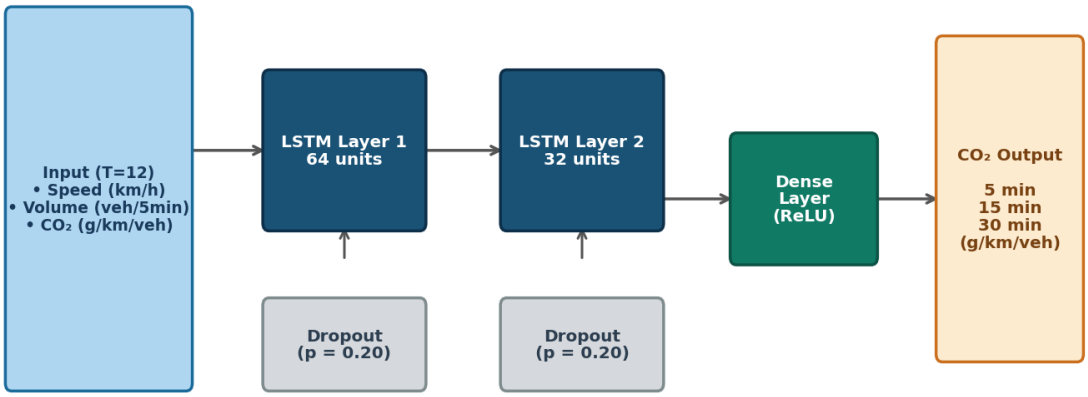


Figure 1. Proposed multivariate LSTM architecture for CO_2 emission prediction.

C. *Baseline Models*

Three models are used for comparison. The first is ARIMA(p,d,q), with orders selected by AIC for each segment and horizon separately. The second is k-nearest neighbours regression (k = 5), using the same 60-minute input window. The third is a feedforward neural network (FFNN) with two hidden layers of 64 and 32 neurons with ReLU activations, trained under the same conditions as the LSTM. All models are tested on the same chronological test set. The Diebold-Mariano test is used to assess whether performance differences are statistically significant at the 5% level.

D. *Evaluation Metrics*

Model performance is measured using Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE), both in g/km/veh after inverse normalisation. Results are given for the full test period and separately for the morning and evening peak subsets, to check how each model performs during high-emission congestion periods.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the prediction accuracy of all models, averaged over the 30 virtual segments. The LSTM records the lowest error at every horizon. At the 15-minute horizon, it reaches a MAE of 4.81 g/km/veh and an RMSE of 6.93 g/km/veh. For comparison, ARIMA gives 6.97/9.89, k-NN gives 6.14/8.77, and FFNN gives 5.59/8.02. This means the LSTM reduces MAE by 30.9% over ARIMA, 21.7% over k-NN, and 14.0% over FFNN. All differences are statistically significant at the 5% level (Diebold-Mariano test, $p < 0.05$).

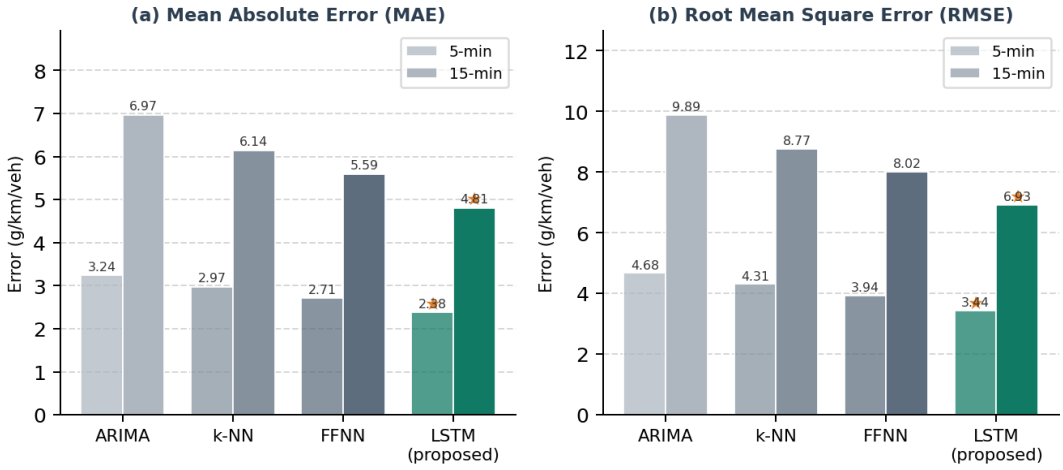


Figure 2. CO_2 emission prediction error comparison across models and horizons (★ = best).

Table 1. CO_2 emission prediction accuracy (MAE / RMSE in g/km/veh) by model and forecast horizon.

Model	MAE 5 min	RMSE 5 min	MAE 15 min	RMSE 15 min
ARIMA	3.24	4.68	6.97	9.89
k-NN	2.97	4.31	6.14	8.77
FFNN	2.71	3.94	5.59	8.02
LSTM (proposed)	**2.38**	**3.44**	**4.81**	**6.93**

The LSTM shows its largest advantage during the morning peak (07:00–09:00). At this time, vehicles frequently accelerate and decelerate, producing non-linear emission spikes. At the 15-minute horizon, the LSTM reaches a morning-peak MAE of 5.74 g/km/veh, compared to 8.42 g/km/veh for ARIMA. This is a 31.8% reduction. During off-peak hours, the gap is smaller: the LSTM reaches 3.91 and ARIMA reaches 4.88. This is expected, as free-flow traffic is more regular and easier for all models to track.

To test the value of using multiple inputs, the LSTM was retrained using only the CO_2 emission rate, without speed and volume. MAE increased by 9.3% at the 15-minute horizon. This confirms that including traffic speed and volume alongside the emission rate improves prediction accuracy. Emission prediction should not be treated as a standalone time-series problem.

IV. Conclusions

This study presented an LSTM-based model for short-term CO_2 emission prediction on urban arterial roads. A synthetic dataset was generated using COPERT emission factors and a Markov-chain traffic state model. The LSTM outperformed ARIMA, k-NN, and FFNN at all forecast horizons. The largest gains were seen during peak congestion periods, where emission patterns are most irregular. Using traffic speed and volume alongside emission history as model inputs was essential for good accuracy.

These findings show that LSTM-based emission prediction can be integrated into real-time traffic management platforms for signal optimisation and eco-routing. Future work will include additional pollutants such as NO_x and $PM_{2.5}$, add weather and road-grade variables as inputs, and test on publicly available real-world datasets. Graph-based spatiotemporal models that use road network topology are also planned.

Acknowledgements

The author declares no specific funding related to this study.

References

[1] IEA, *CO2 Emissions from Fuel Combustion*, International Energy Agency, Paris, 2023.

[2] M. S. Ahmed and A. R. Cook, "Analysis of freeway traffic time-series data by using Box-Jenkins techniques," *Transportation Research Record*, 722, 1-9, 1979.

[3] B. M. Williams and A. H. Lester, "Modeling and forecasting vehicular traffic flow as a seasonal ARIMA process," *Journal of Transportation Engineering*, 129(6), 664-672, 2003.

[4] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780, 1997.

[5] X. Ma, Z. Tao, Y. Wang, H. Yu, and Y. Wang, "Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data," *Transportation Research Part C*, 54, 187-197, 2015.

[6] Z. Zhao, W. Chen, X. Wu, P. C. Y. Chen, and J. Liu, "LSTM network: A deep learning approach for short-term traffic forecast," *IET Intelligent Transport Systems*, 11(2), 68-75, 2017.

[7] W. Brilon, J. Geistefeldt, and M. Regler, "Reliability of freeway traffic flow: A stochastic concept of capacity," *Transportation and Traffic Theory*, 16, 125-144, 2005.

[8] L. Ntziachristos and Z. Samaras, "1.A.3.b.i-iv Road Transport," in *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 – Update Oct. 2020*, European Environment Agency, Copenhagen, 2021.

[9] X. Jiang and H. Adeli, "Dynamic wavelet neural network model for traffic flow forecasting," *Journal of Transportation Engineering*, 131(10), 771-779, 2005.

[10] Y. Lv, Y. Duan, W. Kang, Z. Li, and F. Y. Wang, "Traffic flow prediction with big data: A deep learning approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 865-873, 2014.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Türkçe Phishing E-Postalarının Tespiti İçin Gerçek ve Sentetik Veri Destekli Makine Öğrenmesi ve BERT Tabanlı Bir Yaklaşım

Merve Gül Kılıç[a], Ahmet Albayrak[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Siber Güvenlik Anabilim Dalı, Düzce/Türkiye
[b] Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Düzce/Türkiye
* **Sorumlu Yazar:** mervegul.tas15@gmail.com

ÖZET

Kimlik avı (phishing) saldırıları, özellikle e-posta tabanlı sosyal mühendislik saldırıları içerisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada Türkçe e-posta içeriklerinde oltalama saldırılarının tespit edilmesine yönelik veri odaklı ve karşılaştırmalı bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında farklı kaynaklardan elde edilen Türkçe e-posta veri setleri bir araya getirilmiş ve etiket standardizasyonu gerçekleştirilmiştir. Birleştirme sonrasında yapılan tekrar analizi, veri kaynaklarının önemli ölçüde aynı e-postalardan oluştuğunu göstermiştir. Bu nedenle birebir tekrar eden kayıtların temizliği uygulanmış ve yalnızca benzersiz kayıtlar veri havuzunda tutulmuştur. Veri çeşitliliğini artırmak amacıyla Türkçe SMS spam veri seti e-posta formatına uyarlanarak veri havuzuna eklenmiştir. Bunun yanı sıra, veri setinin büyüklüğünü artırmak amacıyla kurum, kargo ve abonelik temalı senaryolar kullanılarak sentetik Türkçe phishing e-postaları üretilmiştir. Elde edilen veri seti üzerinde klasik makine öğrenmesi yöntemleri (TF-IDF + SVM) ve bağlamsal dil modeli tabanlı derin öğrenme yaklaşımı (BERT) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modellerin performansı doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru gibi ölçütler kullanılarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, BERT tabanlı modelin %99 seviyesine ulaşan F1-skoru ile yüksek başarı sağladığını göstermektedir. Ayrıca sentetik verinin özellikle duyarlılık metriğini artırarak oltalama e-postalarının daha etkin biçimde yakalanmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *BERT, Doğal dil işleme, Phishing tespiti, Türkçe e-posta, Makine öğrenmesi.*

A Machine Learning and BERT-Based Approach for Detecting Turkish Phishing Emails Using Real and Synthetic Data

ABSTRACT

Phishing attacks are among the most common forms of social engineering threats, particularly in email-based communication systems. This study proposes a data-driven approach for detecting phishing emails written in Turkish by combining classical machine learning and deep learning methods. In the first stage, multiple Turkish email datasets collected from different sources were merged and standardized into a unified labeling scheme. During this process, a significant duplicate problem was identified across datasets. Therefore, an exact duplicate removal process was applied to ensure that only unique email samples remained in the dataset. To increase data diversity, a Turkish SMS spam dataset was adapted into email format and integrated into the training corpus. In addition, template-based synthetic Turkish phishing emails were generated using scenarios such as institutional notifications, delivery services, subscription warnings, and payment alerts. The final dataset was evaluated using both classical machine learning models based on TF-IDF features and a deep learning approach using a BERT language model. Experimental results demonstrate that the BERT-based model achieved an F1-score close to 0.99 on the strict real-world test set. Furthermore, the inclusion of synthetic phishing emails improved recall performance by reducing the number of undetected phishing instances.

Keywords: *BERT, Phishing detection, Natural language processing, Turkish emails, Machine learning.*

I. GİRİŞ

Dijital iletişim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte siber tehditlerin hem çeşitliliği hem de etkisi önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle sosyal mühendislik tabanlı saldırılar, teknik güvenlik mekanizmalarını doğrudan hedef almak yerine kullanıcı davranışlarını manipüle etmeleri nedeniyle günümüzde en kritik siber güvenlik problemleri arasında değerlendirilmektedir [1]. Bu saldırı türleri içerisinde yer alan oltalama (phishing) saldırıları, kullanıcıları sahte mesajlar, bağlantılar veya güvenilir kurumları taklit eden içerikler aracılığıyla kandırarak hassas bilgilerin ele geçirilmesini amaçlamaktadır [1], [9].

Phishing saldırıları çoğunlukla e-posta tabanlı olarak gerçekleştirilmekte olup saldırganlar; banka bildirimleri, kargo mesajları, abonelik uyarıları ve hesap doğrulama talepleri gibi içerikler kullanarak kullanıcıları sahte sistemlere yönlendirmektedir. E-posta sistemlerinin düşük maliyetli olması, kısa sürede geniş kullanıcı kitlelerine ulaşabilmesi ve kullanıcı güvenini hedef alan içeriklerin kolaylıkla üretilebilmesi nedeniyle phishing saldırılarında yoğun biçimde tercih edildiği bilinmektedir [2], [3]. Son yıllarda üretken yapay zekâ ve büyük dil modellerinin gelişmesiyle birlikte phishing mesajlarının dil yapısının daha doğal, tutarlı ve ikna edici hale geldiği, bu durumun geleneksel güvenlik mekanizmalarının etkinliğini azalttığı belirtilmektedir [4].

Geleneksel phishing tespit yöntemleri çoğunlukla URL kara listeleri, IP analizleri, alan adı incelemeleri ve e-posta başlık bilgileri gibi yapısal özelliklere dayanmaktadır. Ancak saldırganların sürekli yeni alan adları üretmesi, içerik tabanlı manipülasyonları artırması ve mevcut filtreleme mekanizmalarını aşmaya yönelik yöntemler geliştirmesi nedeniyle bu yaklaşımların tek başına yeterli olmadığı görülmektedir [9], [10]. Bu nedenle son yıllarda doğal dil işleme (Natural Language Processing - NLP) ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler phishing tespiti çalışmalarında ön plana çıkmıştır. Özellikle metin içeriklerinin doğrudan analiz edilmesi sayesinde kullanıcıyı yönlendirmeye yönelik dil kalıpları, manipülatif ifadeler ve bağlamsal örüntüler otomatik olarak tespit edilebilmektedir [8].

Literatürde phishing e-postalarının otomatik tespiti amacıyla farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri önerilmiştir. Özellikle TF-IDF tabanlı metin temsil yöntemleri ile desteklenen geleneksel sınıflandırıcıların başarılı sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [1]. Bunun yanı sıra Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) tabanlı derin öğrenme modellerinin spam ve phishing içeriklerinin sınıflandırılmasında etkili performans sergilediği gösterilmiştir [2], [7]. Derin öğrenme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte metin sınıflandırma problemlerinde daha güçlü temsil yetenekleri sunan modeller yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır [11], [12].

Son yıllarda özellikle Transformer mimarisi tabanlı modellerin doğal dil işleme alanında önemli başarılar elde ettiği görülmektedir [6]. BERT gibi çift yönlü bağlamsal dil modelleri, kelimeleri yalnızca bağımsız biçimde değil cümle içerisindeki bağlamsal ilişkileriyle birlikte değerlendirebildiğinden phishing içeriklerinde kullanılan manipülatif dil yapılarını daha etkili biçimde öğrenebilmektedir [5]. Ayrıca Türkçe gibi eklemeli ve morfolojik açıdan zengin dillerde bağlamsal dil modellerinin daha başarılı sonuçlar üretebildiği belirtilmektedir [4].

Bununla birlikte literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Türkçe phishing e-posta tespiti üzerine gerçekleştirilen araştırmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Mevcut çalışmaların büyük bölümü İngilizce veri kümeleri üzerine yoğunlaşmakta olup Türkçe gibi düşük kaynaklı diller için yeterli büyüklükte ve çeşitlilikte veri setlerinin bulunmaması önemli bir problem oluşturmaktadır [1]. Ayrıca bazı veri kümelerinde tekrar eden kayıtların bulunması ve veri sızıntısı problemlerinin yeterince kontrol edilmemesi, modellerin gerçek kullanım koşullarındaki performanslarının olduğundan yüksek görünmesine neden olabilmektedir. Bu durum özellikle siber güvenlik uygulamalarında model genelleme başarısının güvenilir biçimde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada Türkçe phishing e-postalarının tespit edilmesine yönelik veri odaklı ve karşılaştırmalı bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışma kapsamında farklı veri kaynaklarından elde edilen Türkçe e-posta içerikleri bir araya getirilmiş, veri temizleme ve ön işleme adımları uygulanmış ve veri seti sentetik veri üretimi ile genişletilmiştir. Ayrıca veri tekrarlarının model performansını yapay biçimde artırmasını önlemek amacıyla veri sızıntısından arındırılmış kontrollü bir deneysel yapı oluşturulmuştur.

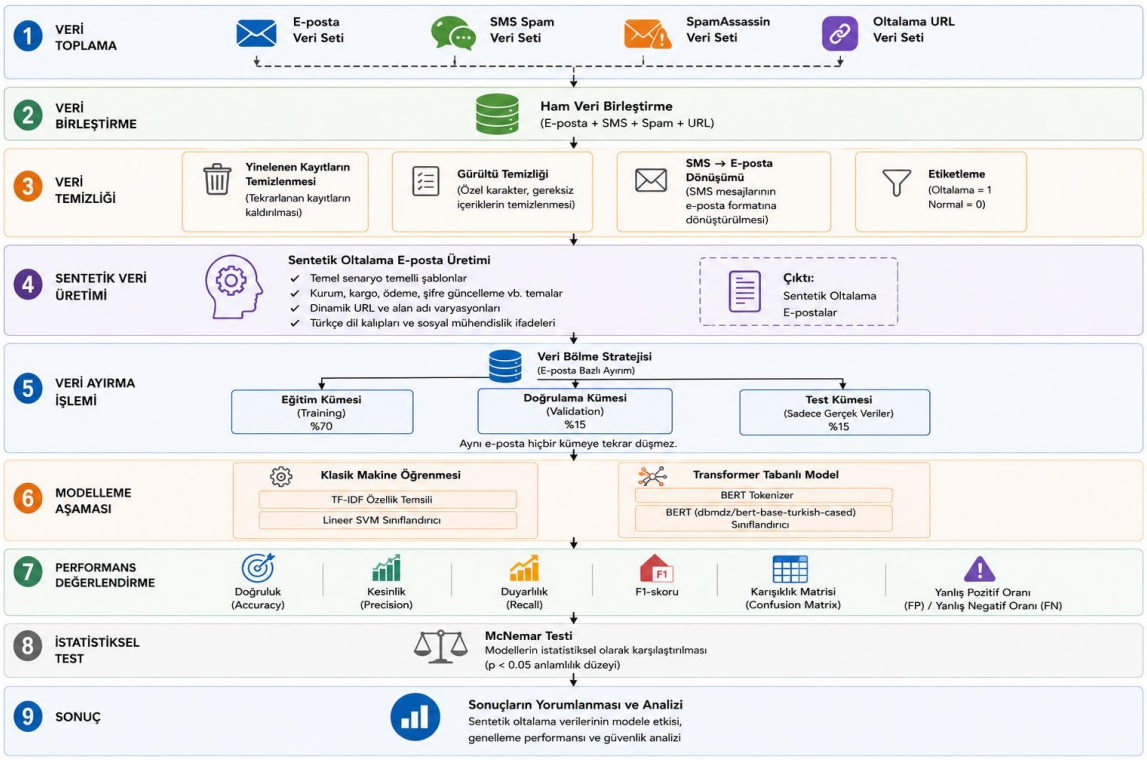
Oluşturulan veri seti üzerinde hem klasik makine öğrenmesi yöntemleri (TF-IDF + Support Vector Machine) hem de Transformer tabanlı bağlamsal dil modeli yaklaşımı (BERT) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra sentetik phishing verilerinin model performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve özellikle duyarlılık (recall) ile yanlış negatif hata oranları üzerindeki değişimler incelenmiştir.

Bu çalışmanın temel katkıları dört başlık altında özetlenebilir. İlk olarak, farklı veri kaynaklarından elde edilen Türkçe phishing ve spam veri setleri birleştirilerek kapsamlı bir veri havuzu oluşturulmuştur. İkinci olarak, birebir tekrar eden kayıtların temizlenmesi ve veri sızıntısından arındırılmış deneysel yapı sayesinde daha güvenilir bir değerlendirme yaklaşımı uygulanmıştır. Üçüncü olarak, Türkçe veri eksikliğini

azaltmak amacıyla farklı senaryolara dayalı sentetik phishing e-postaları üretilmiş ve bu verilerin model performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak, TF-IDF tabanlı Doğrusal Destek Vektör Makinesi modeli ile Transformer tabanlı BERT modeli karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek Türkçe phishing tespiti açısından kapsamlı bir analiz sunulmuştur.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Türkçe phishing e-postalarının tespit edilmesine yönelik veri odaklı ve karşılaştırmalı bir yaklaşım benimsenmiştir. Çalışma kapsamında farklı kaynaklardan elde edilen gerçek e-posta verileri bir araya getirilmiş, veri temizleme ve ön işleme adımları uygulanmış, veri seti sentetik phishing içerikleri ile genişletilmiş ve oluşturulan veri havuzu üzerinde farklı makine öğrenmesi yaklaşımları değerlendirilmiştir. Çalışmanın genel işlem akışı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmanın genel işlem akışı

Çalışmada kullanılan veri setleri ve içerik türleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Veri havuzu; gerçek phishing e-postaları, spam içerikleri, normal e-postalar, SMS spam verileri ve sentetik olarak oluşturulan phishing içeriklerinden meydana gelmektedir. Farklı veri kaynaklarının birlikte kullanılması, modelin yalnızca belirli kalıpları değil farklı phishing senaryolarını öğrenebilmesine katkı sağlamaktadır.

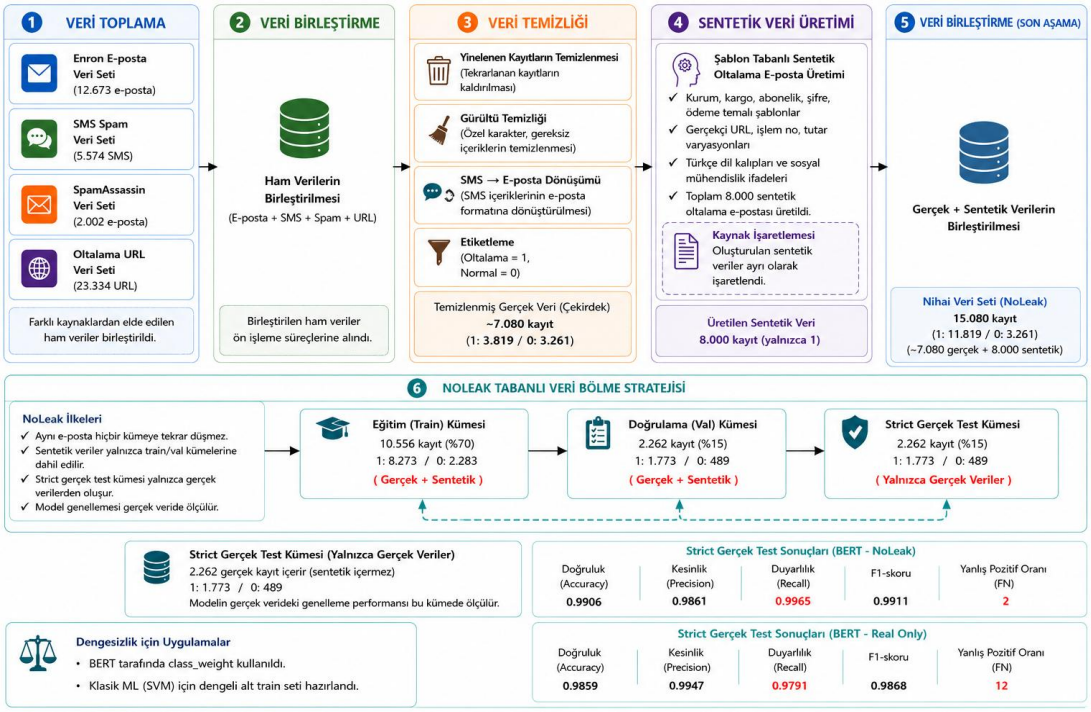
Tablo 1 incelendiğinde veri setinin hem gerçek kullanıcı verileri hem de veri artırma yöntemleri kullanılarak genişletildiği görülmektedir. Özellikle Türkçe phishing veri kümelerinin sınırlı olması nedeniyle veri çeşitliliğini artırmak amacıyla SMS spam verileri e-posta formatına dönüştürülmüş ve sentetik phishing içerikleri veri havuzuna dahil edilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri kaynakları

Veri Seti	İçerik Türü	Örnek Sayısı	Açıklama
turkish_phishing_dataset	E-posta	7.504	Türkçe phishing ve güvenilir e-postalar
turkish_mail_normal_spam	E-posta	1.017	Spam ve normal e-postalar
tr_email_spam	E-posta	826	Spam / non-spam e-posta verisi
SMS Spam Dataset	SMS	4.274	SMS spam verisi e-posta formatına dönüştürüldü

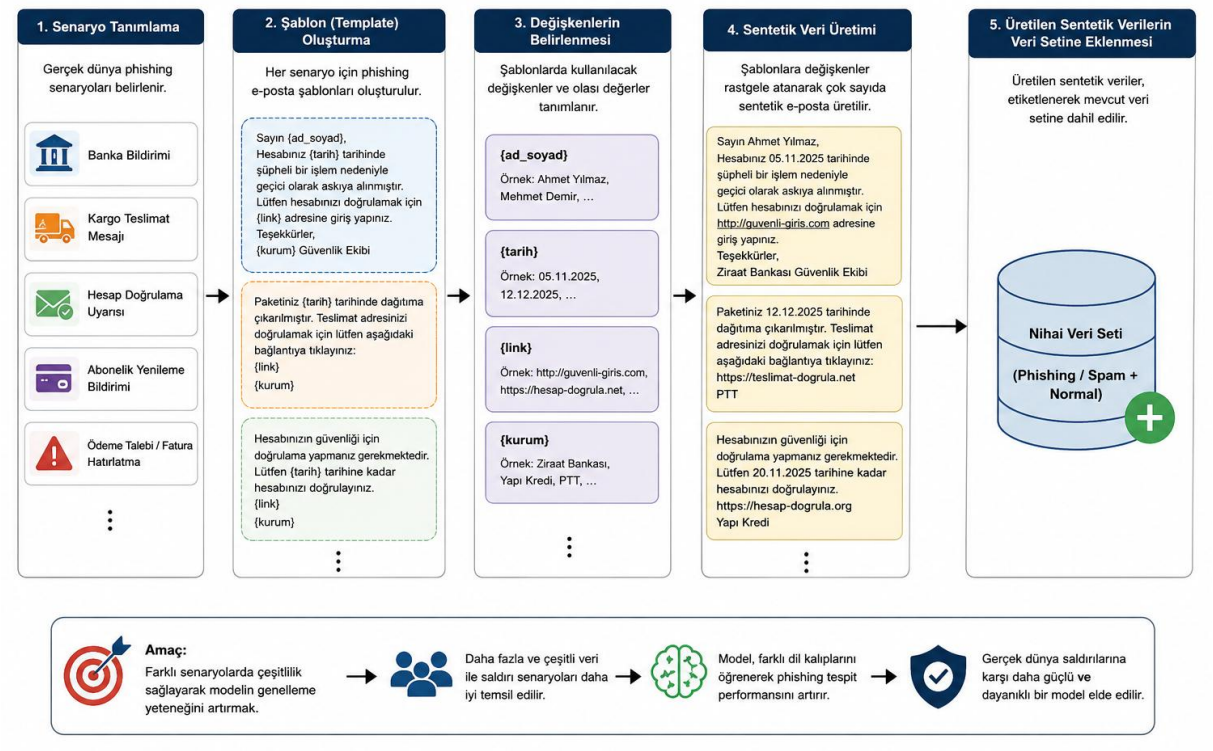
Sentetik Phishing	E-posta	8.000	Template tabanlı oluşturulan Türkçe phishing e-postaları

Veri setlerinin birleştirilmesi sonrasında veri kalitesini artırmak amacıyla çeşitli ön işleme adımları uygulanmıştır. Veri hazırlama ve veri sızıntısını önlemeye yönelik uygulanan işlem adımları Şekil 2'de sunulmaktadır. Bu kapsamda metinlerde bulunan gereksiz karakterler, HTML etiketleri, bağlantı kalıntıları ve anlamsal açıdan bilgi taşımayan içerikler temizlenmiştir. Ardından metinler normalize edilerek modelleme sürecine uygun hale getirilmiştir. Veri hazırlama sürecinde özellikle veri tekrarlarının model performansını yapay biçimde artırmaması amacıyla birebir tekrar eden kayıtların temizlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece modelin belirli örnekleri ezberlemesi engellenerek daha güvenilir bir değerlendirme ortamı oluşturulmuştur.



Şekil 2. Veri Hazırlama ve NoLeak Süreci

Veri setinin sınırlı yapısını geliştirmek amacıyla veri zenginleştirme tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu doğrultuda SMS spam verileri e-posta formatına dönüştürülerek veri havuzuna dahil edilmiş, ayrıca farklı senaryolar temel alınarak sentetik phishing e-postaları oluşturulmuştur. Sentetik veri üretim sürecinde banka bildirimleri, kargo teslim mesajları, hesap doğrulama uyarıları, abonelik yenileme bildirimleri ve ödeme talepleri gibi gerçek dünya senaryolarını temsil eden şablonlar kullanılmıştır. Böylece modelin farklı dil kalıplarını öğrenebilmesi amaçlanmıştır. Sentetik veri üretim süreci ve kullanılan şablon yapıları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Sentetik veri üretim süreci

Veri hazırlama süreci sonunda elde edilen nihai veri setinin sınıf dağılımı Tablo 2'de gösterilmektedir. Veri kümesinde phishing/spam sınıfına ait örneklerin sayısının artırılması sayesinde modelin saldırı örüntülerini daha etkin biçimde öğrenebilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 2. Nihai veri seti dağılımı

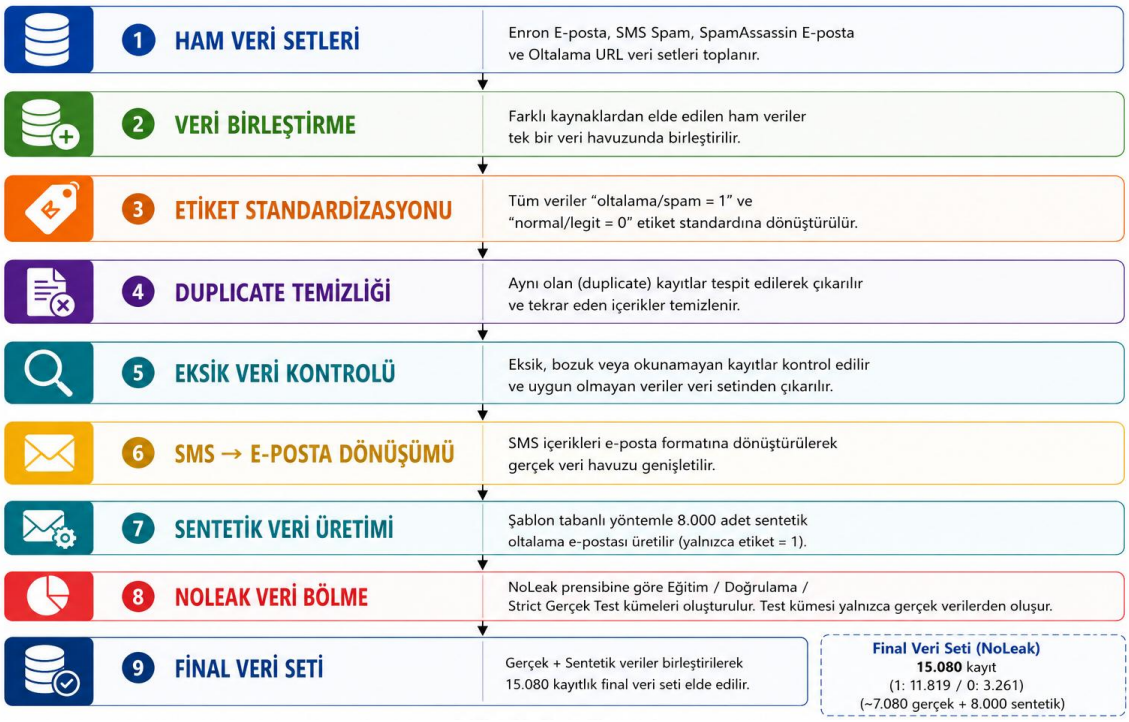
Sınıf	Açıklama	Örnek Sayısı
1	Phishing / Spam	11.819
0	Normal / Legitimate	3.261
Toplam		15.080

Oluşturulan veri seti, model performansının güvenilir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla stratified sampling yöntemi kullanılarak eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayrılmıştır. Bu yöntem sayesinde sınıf dağılımı tüm veri alt kümelerinde korunmuştur. Veri bölünmesine ilişkin detaylar Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Veri setinin eğitim ve test bölünmesi

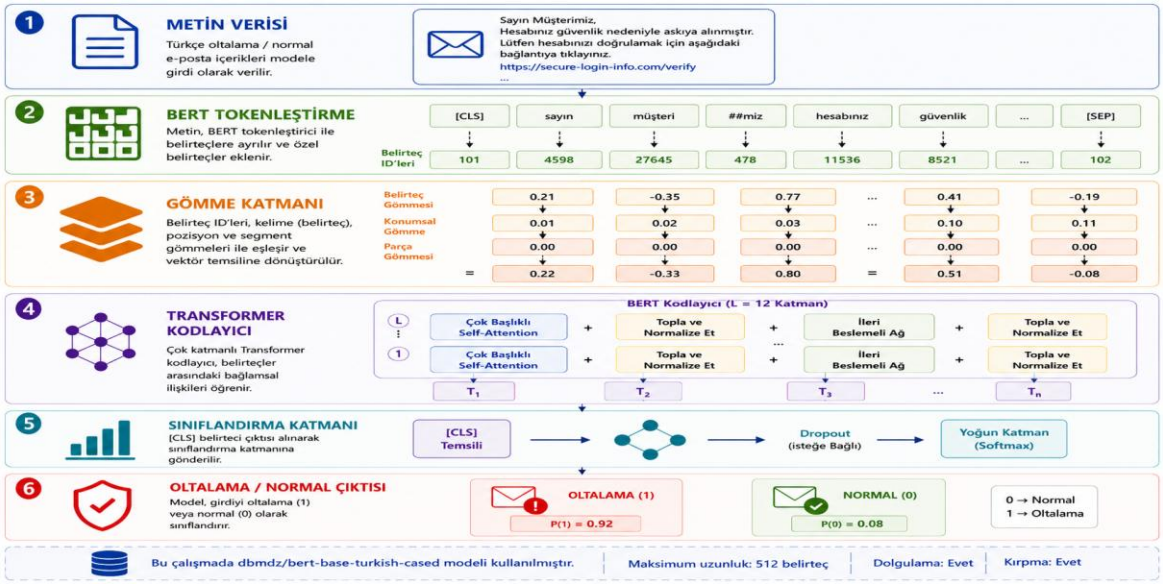
Veri Bölmesi	Phishing (1)	Normal (0)	Toplam
Train	8.273	2.283	10.556
Validation	1.773	489	2.262
Test	1.773	489	2.262

Çalışmada iki farklı modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. İlk yaklaşımda klasik makine öğrenmesi yöntemi tercih edilmiş ve metin verileri TF-IDF yöntemi kullanılarak sayısal özellik vektörlerine dönüştürülmüştür. TF-IDF yöntemi, metin içerisinde önemli kelimelerin ağırlıklandırılmasını sağlayarak phishing içeriklerinde sık kullanılan ifade kalıplarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Elde edilen özellik vektörleri sınıflandırma aşamasında Support Vector Machine (SVM) algoritması ile işlenmiştir. TF-IDF + SVM tabanlı modelleme süreci Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. TF-IDF ve SVM işlem akışı

İkinci yaklaşımda ise Transformer tabanlı bağlamsal dil modeli olan BERT kullanılmıştır. BERT tabanlı phishing sınıflandırma sürecinin genel yapısı Şekil 5'te gösterilmektedir. BERT modeli, kelimeleri yalnızca bağımsız olarak değil bağlamsal ilişkileriyle birlikte değerlendirebildiğinden phishing içeriklerinde kullanılan manipülatif dil yapılarını daha başarılı biçimde öğrenebilmektedir. Model, Türkçe phishing e-postalarını sınıflandırabilmek amacıyla ince ayar (fine-tuning) yöntemi ile eğitilmiştir. Kullanılan model türleri Tablo 4'te özetlenmiştir.



Şekil 5. BERT tabanlı sınıflandırma süreci

Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan modeller

Model Türü	Algoritma	Özellik Temsili
Klasik Makine Öğrenmesi	Support Vector Machine (SVM)	TF-IDF
Derin Öğrenme	BERT	Bağlamsal kelime gömme

Geliştirilen modellerin performansını değerlendirmek amacıyla doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru metrikleri kullanılmıştır. Accuracy metriği modelin genel sınıflandırma başarısını ölçerken precision metriği phishing olarak sınıflandırılan örneklerin doğruluğunu değerlendirmektedir. Recall metriği ise gerçek phishing içeriklerinin ne kadarının doğru tespit edildiğini göstermektedir. Siber güvenlik uygulamalarında yanlış negatif hatalarının kritik risk oluşturması nedeniyle özellikle recall metriği çalışmada önemli değerlendirme ölçütlerinden biri olarak ele alınmıştır. Ayrıca model performansının daha ayrıntılı analiz edilebilmesi amacıyla sınıflandırma sonuçları confusion matrix yapısı üzerinden incelenmiştir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkçe phishing e-postalarının tespiti amacıyla geliştirilen modeller strict gerçek test kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Modellerin performanslarının güvenilir biçimde analiz edilebilmesi amacıyla veri sızıntısından arındırılmış kontrollü bir deneysel yapı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen temel performans ölçütleri Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5 incelendiğinde BERT tabanlı modelin her iki eğitim senaryosunda da yüksek sınıflandırma başarısı elde ettiği görülmektedir. Yalnızca gerçek veriler kullanılarak eğitilen BERT Real-only modelinde doğruluk (accuracy) değeri 0.9859, F1-skoru ise 0.9868 olarak hesaplanmıştır. Gerçek ve sentetik verilerin birlikte kullanıldığı BERT NoLeak senaryosunda ise doğruluk değerinin 0.9906'ya, F1-skorunun ise 0.9913'e yükseldiği gözlemlenmiştir.

Benzer şekilde duyarlılık (recall) metriğinde de önemli bir artış elde edilmiştir. Real-only modelinde recall değeri 0.9791 olarak hesaplanırken, sentetik verilerin dahil edildiği NoLeak modelinde bu değer 0.9965 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, modelin gerçek phishing içeriklerini daha başarılı biçimde tespit edebildiğini göstermektedir. Precision değeri incelendiğinde ise Real-only modelinde 0.9947, NoLeak modelinde ise 0.9862 değeri elde edilmiştir.

Tablo 5. BERT model performans sonuçları

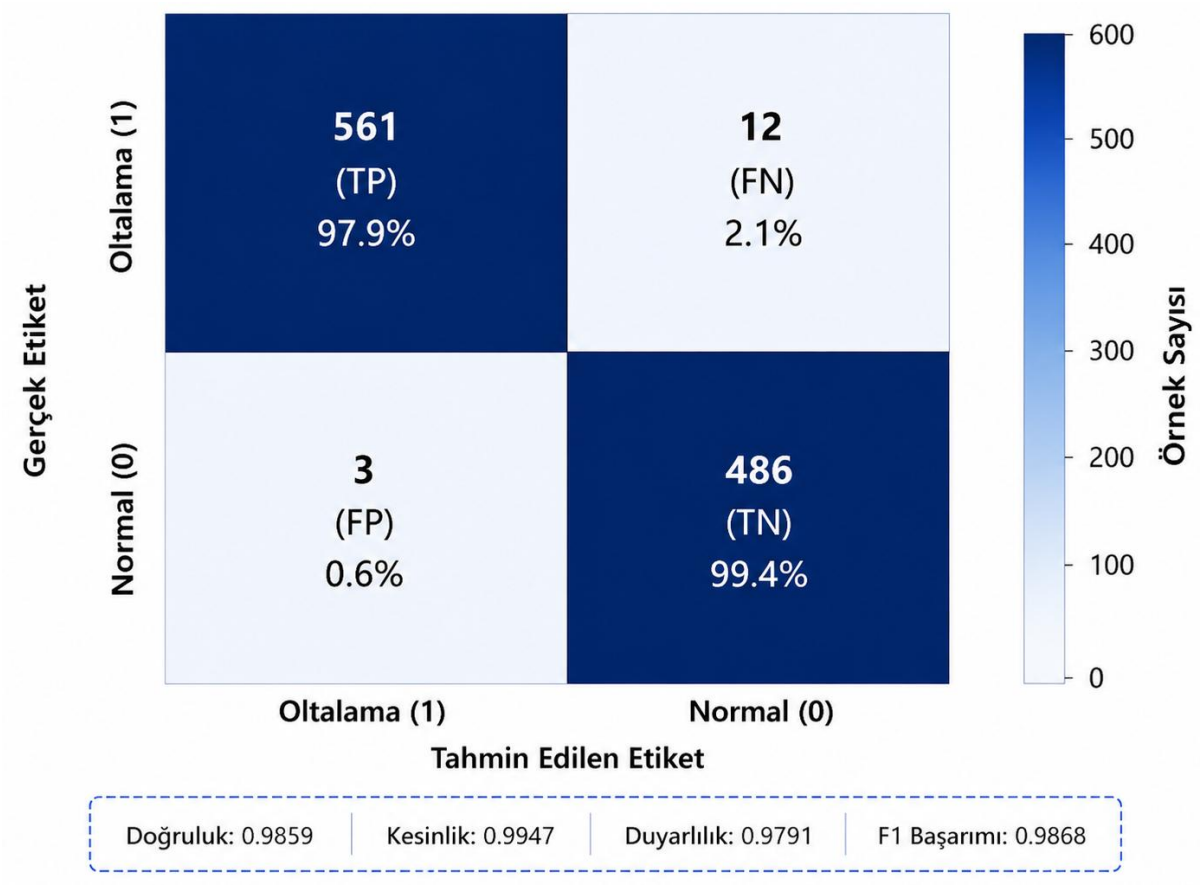
Model	Accuracy	Precision	Recall	F1
BERT Real-only	0.9859	0.9947	0.9791	0.9868
BERT NoLeak	0.9906	0.9862	0.9965	0.9913

Modelin sınıflandırma sonuçlarını daha ayrıntılı inceleyebilmek amacıyla confusion matrix analizi gerçekleştirilmiştir. BERT NoLeak modeline ait confusion matrix sonuçları Tablo 6'da gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre model, 571 phishing e-postasını doğru şekilde sınıflandırırken yalnızca 2 phishing e-postasını yanlışlıkla normal olarak tahmin etmiştir. Aynı zamanda 481 normal e-posta doğru şekilde sınıflandırılmış, 8 normal e-posta ise phishing olarak etiketlenmiştir.

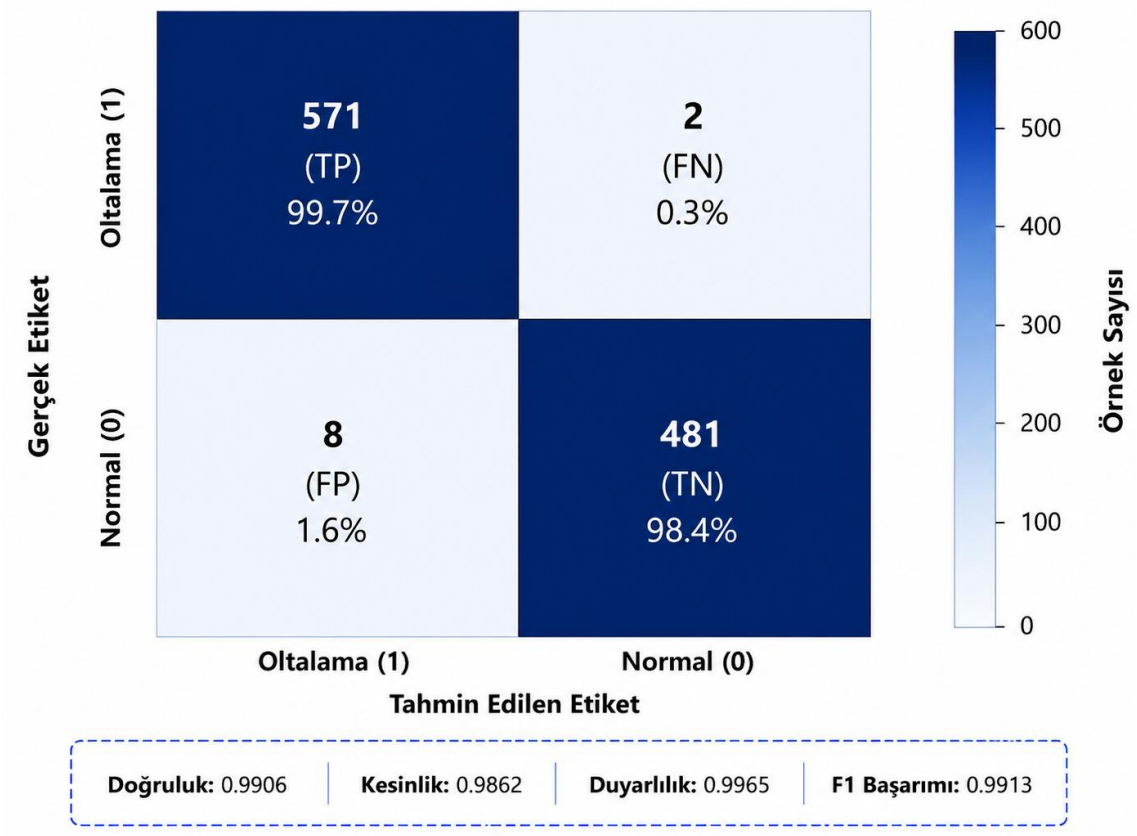
Tablo 6. BERT NoLeak model confusion matrix

	Tahmin: Normal	Tahmin: Phishing
Gerçek: Normal	481	8
Gerçek: Phishing	2	571

BERT Real-only ve BERT NoLeak modellerine ait confusion matrix görselleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmaktadır. Görseller incelendiğinde, NoLeak yaklaşımında yanlış negatif hata sayısının azaldığı ve phishing içeriklerinin daha başarılı biçimde tespit edildiği görülmektedir.



Şekil 6. BERT Real-only confusion matrix



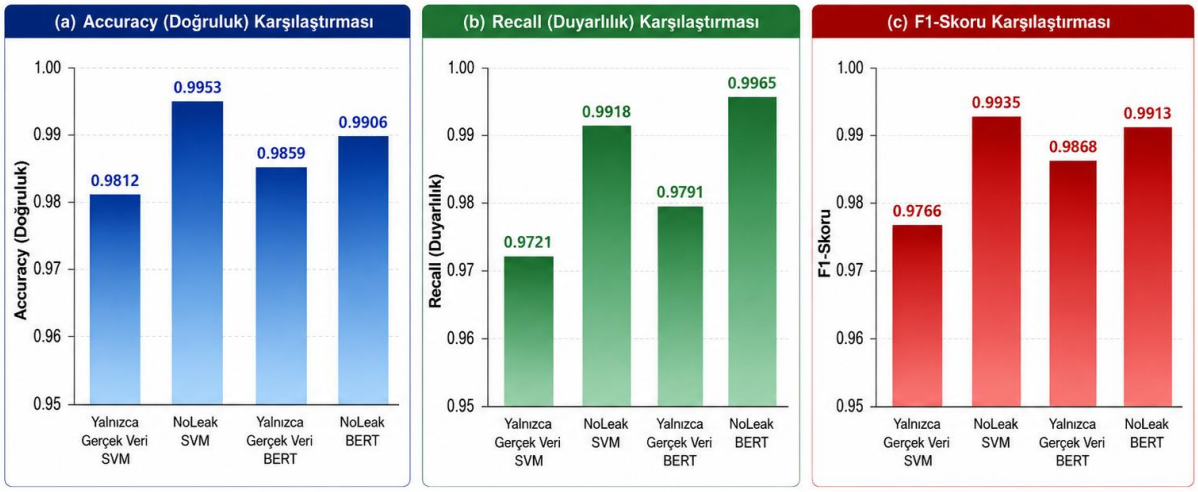
Şekil 7. BERT NoLeak confusion matrix

Deneysel sonuçlar incelendiğinde sentetik veri kullanımının özellikle duyarlılık (recall) metriği üzerinde önemli katkı sağladığı görülmektedir. Gerçek ve sentetik verilerin birlikte kullanıldığı BERT NoLeak senaryosunda recall değerinin 0.9965 seviyesine ulaşması ve yalnızca iki phishing e-postasının yanlış sınıflandırılması, modelin gerçek dünya kullanım senaryoları açısından güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir. Siber güvenlik uygulamalarında yanlış negatif hatalarının kritik risk oluşturduğu düşünüldüğünde, phishing içeriklerinin kaçırılmaması büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca elde edilen bulgular, veri sızıntısından arındırılmış değerlendirme yaklaşımının model performansını daha gerçekçi biçimde analiz etmeye katkı sağladığını göstermektedir. Tekrar eden kayıtların temizlenmesi ve strict test yaklaşımının uygulanması, modellerin belirli örnekleri ezberleme eğilimini azaltarak genelleme performansının daha güvenilir biçimde ölçülmesine olanak sağlamıştır.

BERT NoLeak modelinin özellikle recall metriğinde sağladığı artış, sentetik veri kullanımının phishing tespiti üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Sentetik veriler sayesinde modelin daha fazla phishing senaryosu ile karşılaşması sağlanmış ve farklı manipülatif dil kalıplarını öğrenebilme kapasitesi artırılmıştır. Böylece modelin gerçek saldırıları yakalama başarısında iyileşme gözlemlenmiştir.

Accuracy, recall ve F1-skoru değerlerinin modellere göre karşılaştırmalı dağılımı Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8 incelendiğinde sentetik veri kullanılan NoLeak senaryolarının hem SVM hem de BERT modellerinde performans artışı sağladığı görülmektedir. Özellikle BERT NoLeak modelinin recall metriğinde elde ettiği yüksek değer, phishing içeriklerinin tespitinde sentetik veri kullanımının etkili olduğunu göstermektedir.



Model	Accuracy (Doğruluk)	Recall (Duyarlılık)	F1-Skoru
Yalnızca Gerçek Veri SVM	0.9812	0.9721	0.9766
NoLeak SVM	0.9953	0.9918	0.9935
Yalnızca Gerçek Veri BERT	0.9859	0.9791	0.9868
NoLeak BERT	0.9906	0.9965	0.9913

Şekil 8. Modellerin accuracy, recall ve F1-skoru karşılaştırması

Genel olarak değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar, Transformer tabanlı bağlamsal dil modellerinin Türkçe phishing e-postalarının tespitinde yüksek başarı sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle veri çeşitliliğinin artırılması ve veri sızıntısından arındırılmış değerlendirme stratejilerinin uygulanması, model performansının daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Türkçe phishing e-postalarının tespitinde hem veri hazırlama stratejilerinin hem de kullanılan model mimarisinin performans üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle Transformer tabanlı bağlamsal dil modellerinin, metin tabanlı sosyal mühendislik saldırılarının tespitinde yüksek başarı sağlayabildiği görülmüştür. BERT tabanlı modelin elde ettiği yüksek accuracy, recall ve F1-skoru değerleri, bağlamsal kelime temsillerinin phishing içeriklerinde kullanılan manipülatif dil kalıplarını öğrenmede etkili olduğunu göstermektedir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sentetik veri kullanımının özellikle phishing içeriklerinin tespit başarısı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu görülmektedir. BERT NoLeak modelinde recall değerinin 0.9965 seviyesine ulaşması ve yalnızca iki phishing e-postasının yanlış sınıflandırılması, modelin

gerçek phishing saldırılarını yakalama kapasitesinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Siber güvenlik uygulamalarında yanlış negatif (false negative) hatalarının kritik risk oluşturduğu düşünüldüğünde, phishing içeriklerinin kaçırılmaması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle elde edilen yüksek recall değeri, modelin gerçek dünya kullanım senaryoları açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın önemli bulgularından biri de veri hazırlama sürecinin model performansı üzerindeki belirleyici etkisidir. Farklı veri kaynaklarının birleştirilmesi sırasında tekrar eden kayıtların temizlenmesi ve veri sızıntısını önlemeye yönelik strict test yaklaşımının uygulanması, model performansının daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamıştır. Özellikle phishing tespiti gibi güvenlik odaklı uygulamalarda veri tekrarlarının model tarafından ezberlenmesi, performans değerlerinin olduğundan yüksek görünmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada uygulanan veri hazırlama yaklaşımı sayesinde modellerin genelleme performansları daha güvenilir biçimde analiz edilmiştir.

Sentetik phishing e-postalarının modele sağladığı katkı değerlendirildiğinde, veri çeşitliliğinin artırılmasının modelin farklı saldırı örüntülerini öğrenebilmesine katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle banka bildirimi, hesap doğrulama mesajı, ödeme talebi ve kargo teslim uyarıları gibi farklı senaryoların veri havuzuna dahil edilmesi, modelin manipülatif dil kalıplarını daha geniş bir kapsamda öğrenebilmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, gerçek dünya saldırılarında karşılaşılabilecek farklı phishing varyasyonlarına karşı model dayanıklılığını artırmıştır.

Bununla birlikte sentetik verinin modele sağladığı katkının veri dağılımına ve kullanılan model mimarisine bağlı olarak değişebileceği de dikkate alınmalıdır. Sentetik veriler modelin öğrenme kapasitesini artırabilirken, gerçek veri ile uyumsuz örneklerin üretilmesi durumunda model performansı üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle sentetik veri üretim süreçlerinde gerçek dünya dil yapılarının ve kullanıcı davranışlarının mümkün olduğunca doğru şekilde modellenmesi önem taşımaktadır.

Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, Türkçe phishing veri setlerinin sınırlı olduğu bir alanda veri hazırlama, veri artırma ve modelleme süreçlerini bütüncül biçimde ele almasıdır. Literatürde Türkçe phishing e-posta tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmaların sınırlı olduğu dikkate alındığında, bu çalışmanın hem veri hazırlama yaklaşımı hem de deneysel değerlendirme yapısı açısından alana katkı sağladığı değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, Türkçe metin tabanlı siber güvenlik uygulamalarında hem klasik makine öğrenmesi yöntemlerinin hem de derin öğrenme tabanlı bağlamsal dil modellerinin etkili biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Kullanılan sentetik veriler şablon tabanlı olarak üretildiğinden gerçek kullanıcı davranışlarının tüm çeşitliliğini tam olarak yansıtamayabilir. Ayrıca çalışma yalnızca Türkçe metin tabanlı içerikler üzerinde gerçekleştirilmiş olup URL tabanlı özellikler, e-posta başlık bilgileri, HTML içerikleri ve ağ trafiği verileri değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Bunun yanı sıra çalışma kapsamında yalnızca belirli model mimarileri değerlendirilmiş olup farklı büyük dil modellerinin performansları analiz edilmemiştir.

Gelecek çalışmalarda çok modlu veri kaynaklarının kullanılması, gerçek zamanlı phishing tespit sistemlerinin geliştirilmesi ve daha büyük gerçek dünya veri kümeleri üzerinde farklı Transformer tabanlı modellerin değerlendirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca açıklanabilir yapay zekâ (Explainable AI - XAI) yöntemlerinin kullanılmasıyla modellerin karar verme süreçlerinin analiz edilmesi, phishing tespit sistemlerinin güvenilirliğini artırabilecek önemli araştırma alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada Türkçe phishing e-postalarının tespit edilmesine yönelik veri odaklı ve karşılaştırmalı bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışma kapsamında farklı veri kaynaklarından elde edilen gerçek e-posta içerikleri bir araya getirilmiş, veri temizleme ve ön işleme adımları uygulanmış, tekrar eden kayıtlar temizlenmiş ve sentetik veri üretimi ile veri seti genişletilmiştir. Böylece Türkçe phishing tespiti alanında veri çeşitliliğini artırmaya yönelik kapsamlı bir veri havuzu oluşturulmuştur.

Oluşturulan veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, Transformer tabanlı BERT modelinin yüksek sınıflandırma performansı sergilediği görülmüştür. Özellikle BERT NoLeak senaryosunda elde edilen yüksek accuracy, recall ve F1-skoru değerleri, bağlamsal dil modellerinin phishing içeriklerinde kullanılan manipülatif dil kalıplarını etkili biçimde öğrenebildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, veri sızıntısından arındırılmış değerlendirme yaklaşımının model performansını daha güvenilir biçimde analiz etmeye katkı sağladığını da ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan sentetik phishing verilerinin özellikle duyarlılık (recall) metriği üzerinde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Recall değerindeki artış, modelin gerçek phishing e-postalarını daha başarılı biçimde tespit edebildiğini göstermektedir. Siber güvenlik uygulamalarında yanlış negatif hatalarının kritik risk oluşturduğu dikkate alındığında, phishing içeriklerinin kaçırılmaması büyük

önem taşımaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde sentetik veri kullanımının gerçek dünya phishing tespit sistemleri açısından önemli katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma, Türkçe phishing tespiti alanında veri hazırlama süreci, sentetik veri üretimi ve veri sızıntısından arındırılmış deneysel değerlendirme yaklaşımını birlikte ele alması açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca hem klasik makine öğrenmesi yöntemlerinin hem de Transformer tabanlı derin öğrenme modellerinin aynı veri yapısı üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, farklı model yaklaşımlarının performanslarının kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Sonuç olarak, Türkçe metin tabanlı siber güvenlik uygulamalarında veri çeşitliliğinin artırılması, veri sızıntısının kontrol edilmesi ve bağlamsal dil modellerinin kullanılması, phishing tespit sistemlerinin performansını artırmak için etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen bulguların, gelecekte geliştirilecek Türkçe phishing tespit sistemleri ve gerçek zamanlı siber güvenlik uygulamaları için önemli bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında değerli katkı ve yönlendirmeleri için danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Albayrak'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

[1] M. Turhanlar and C. Acartürk, "Detecting Turkish phishing attack with machine learning algorithm," *Proceedings of the 17th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WEBIST)*, pp. 577–584, 2021.

[2] E. E. Eryılmaz, D. Ö. Şahin and E. Kılıç, "Filtering Turkish spam using LSTM from deep learning techniques," *IEEE International Conference on Computer Science and Engineering*, 2020.

[3] E. E. Eryılmaz, D. Ö. Şahin and E. Kılıç, "Machine learning based spam e-mail detection system for Turkish," *International Conference on Computer Science and Engineering*, 2020.

[4] E. Gülserliler, D. E. Keneş and Ş. Bahtiyar, "Turkish email phishing detection using fine tuned large language models," *15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), IEEE*, 2025.

[5] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee and K. Toutanova, "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding," *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT)*, pp. 4171–4186, 2019.

[6] A. Vaswani et al., "Attention Is All You Need," *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, vol. 30, 2017.

[7] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.

[8] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. Corrado and J. Dean, "Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 26, 2013.

[9] F. Thabtah and D. Peebles, "A New Machine Learning Model Based on Induction of Rules for Phishing Websites Classification," *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 966–983, 2018.

[10] R. Verma and K. Dyer, "On the Character of Phishing URLs: Accurate and Robust Statistical Learning Classifiers," *Proceedings of the 5th ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*, pp. 111–122, 2015.

[11] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, "Deep Learning," *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, 2015.

[12] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville, Deep Learning, MIT Press, 2016.s

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

NFC Enerji Hasatlı Bataryasız Akıllı Kilit Sistemi için Mobil Uygulama Entegrasyonu: EcoKey

Coşkun Harmanşah[a], Feti Adar[b], Volkan Sözeri[c], Hakan Magat[d]*

[a,c]Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, İzmir/Türkiye.
[b]Coderonics Teknoloji A.Ş., İzmir/Türkiye.
[d]Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Manisa/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** coskun.harmansah@ege.edu.tr

ÖZET

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) ekosistemi, özellikle pil değişimi ve bakım maliyetleri nedeniyle çeşitli sürdürülebilirlik sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu çalışmada, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan çalışan akıllı kilit sistemi "Ecokey" için geliştirilen bir mobil uygulama ve entegrasyonu sunulmuştur. Geliştirilen sistem, NTAG 5 Switch entegre devresinin enerji toplama özelliğini kullanarak, bir mobil cihazdan gelen Yakın Alan İletişimi (Near Field Communication-NFC) 13,56 MHz Radyo Frekansı (RF) sinyallerini Doğru Akıma (Direct Current-DC) dönüştürmektedir. Bu enerji daha sonra bir süper kapasitörde (SCAP) depolanarak elektromekanik kilit motorunu çalıştırmaktadır. Bu araştırmadaki donanım testleri NTAG 5 geliştirme kartı üzerinde gerçekleştirilirken, enerji aktarımını optimize etmek için tasarlanmış yazılım algoritmaları hem iOS (iPhone İşletim Sistemi) hem de Android platformları için incelenmiştir. Android cihazlarda, sürekli enerji aktarımını sağlamak için "Reader Mode (Okuyucu Modu)" kullanılmıştır. Buna karşılık, iOS platformu için şarj süreci, kullanıcı etkileşimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Sonuçlar, sistemin metal yüzeylerden kaynaklanan girişimlere duyarlı olduğunu ve şarj sürelerinin farklı kondansatör değerlerine göre değiştiğini göstermektedir. Bu çalışma, uygun donanım seçimi ve optimize edilmiş yazılım entegrasyonu sayesinde pilsiz güvenli kilit sistemlerinin ticari olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Bataryasız akıllı kilit, Mobil uygulama entegrasyonu, NFC enerji hasadı, NTAG 5 anahtar entegresi, React native.*

Mobile Application Integration for NFC Energy Harvesting Battery-Free Smart Lock System: EcoKey

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) ecosystem faces various sustainability challenges, particularly due to the cost associated with battery replacement and maintenance. This study presents the implementation and integration of a mobile application for "Ecokey," a smart lock system that operates without the need for an external power source. The developed system utilizes the energy harvesting feature of the NTAG 5 Switch integrated circuit to convert Near Field Communication (NFC) 13.56 MHz Radio Frequency (RF) signals from a mobile device into Direct Current (DC). This energy is subsequently stored in a Supercapacitor (SCAP) to drive an electromechanical lock motor. Hardware testing in this research was conducted on the NTAG 5 development board, while software algorithms designed to optimize energy transfer were examined for both iOS and Android platforms. On Android devices, "Reader Mode" was employed to ensure continuous energy transmission. Conversely, for the iOS (iPhone Operating System) platform, the charging process was designed to be user interactive. The results demonstrate that the system is susceptible to interference from metallic surfaces and that charging times vary based on different capacitor values. This work indicates that the battery-free secure lock systems are commercially viable through the selection of appropriate hardware and optimized software integration.

Keywords: *Battery-free smart lock, Mobile application integration, NFC energy harvesting, NTAG 5 switch, React native framework.*

I. GİRİŞ

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) ekosistemi, farklı sektörlerde hızla yaygınlaşmakta ve günlük yaşamın birçok alanında yer bulmaktadır. Akıllı ev sistemleri, güvenlik çözümleri, sağlık teknolojileri ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar, kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişimi sayesinde daha erişilebilir hale gelmiştir [1]. IoT tabanlı uygulamalarda kablosuz iletişim olarak Wi-Fi, Bluetooth, RFID ve Yakın Alan İletişim (Near Field Communication NFC) en sık kullanılan teknolojilerdir. Yakın Alan İletişimi olarak da bilinen NFC 13.56 MHz frekansında çalışan bir protokol olup HF RFID protokollerini (ISO 14443 ve ISO 15963) paylaşmaktadır. NFC, RFID teknolojisine kıyasla etiket-okuyucu modları arasında geçiş yapabilmesi ve iki yönlü veri aktarımını mümkün kılan özelliklere sahiptir. Wi-Fi ve Bluetooth, yüksek veri aktarım kapasitesi ve geniş kullanım alanlarıyla öne çıkarken; RFID ve NFC, düşük enerji tüketimi ve yakın mesafe iletişim avantajlarıyla özellikle kimlik doğrulama ve erişim kontrol sistemlerinde tercih edilmektedir [2]. Akıllı kilit sistemleri genellikle Wi-Fi, Bluetooth veya Zigbee gibi yüksek enerji tüketen iletişim protokolleri üzerine inşa edilmiştir. Bu teknolojilerin kullanıldığı IoT cihazları sürekli bir güç kaynağı veya pil destekli çalışmaktadır. IoT ekosisteminde kullanılan kablosuz haberleşme teknolojileri; operasyonel kapsama alanı, güç gereksinimleri ve çalışma frekansları temelinde sınıflandırılmaktadır. Bu kapsamda öne çıkan iletişim teknolojilerinin karakteristik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Kablosuz iletişim teknolojileri

Teknoloji	Çalışma Frekansı	Operasyonel Menzil	Özellikler
	~2.4 GHz	<100 m	Düşük enerji tüketimi, mobil cihazlara kolay entegrasyon.
	2.4 / 5 GHz	Geniş Kapsam	Uzaktan erişim ve bulut entegrasyonu, yüksek veri hızı, yüksek enerji tüketimi.
	125 kHz / 13.56 MHz	1- 100 cm	Endüstriyel erişim kontrolü için uygun, pasif sistemlerde yüksek okuma kararlılığı.
	13.56 MHz	<10 cm	Temassız anlık erişim, çok kısa mesafe erişimi ile fiziksel güvenlik, düşük enerji tüketimi.

Güvenlik odaklı IoT cihazlar için pil değişimi ve enerji sürekliliği temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan "enerji hasatlama" (energy harvesting) teknolojileri, sürdürülebilirlik açısından öne çıkmaktadır. NFC teknolojisi hem veri transferi hem de enerji hasatlama yeteneğiyle pilsiz sistemlerin geliştirilmesinde yenilikçi imkanlar sunmaktadır [3, 4]. Bu teknoloji, 13.56 MHz Radyo Frekansı (RF) bandında mobil cihazlardan hasatladığı enerjiyle uç birimlerdeki pasif bileşenleri tetikleyebilmekte, elektronik ve elektromekanik devreleri sürebilmektedir. Bu özellikleriyle NFC, enerji ve güvenlik gereksinimlerinin ön planda olduğu IoT tabanlı akıllı pilsiz kilit sistemleri için diğer kablosuz teknolojilere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. NFC üzerinden hasatlanan enerji miktarı, düşük güç tüketimli sensör uygulamaları için kritik bir faktördür. NFC konusunda yapılan çalışmalar; rezonans kapasitör seçimi, okuyucu ile anten mesafesi (kaplin faktörü), düşük güç tüketimli gömülü sistemler, enerji hasatlama performansına üzerine odaklanmaktadır [5, 6, 7, 8]. NFC tabanlı enerji hasatlama çözümleri, IoT cihazlarının pilsiz çalıştırılmasına yönelik yeni çözümleri ve uygulamaları gündeme getirmiştir. NXP ve Infineon gibi üreticilerin geliştirdiği NFC tabanlı çipler ve geliştirme kitleri, mobil cihazlardan gelen RF sinyallerini doğru akıma dönüştürerek süper kapasitörlerde depolama imkânı sunmaktadır. Bu teknolojiler, özellikle güvenlik sistemlerinde enerji bağımsızlığı sağlayarak bakım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir.

NFC teknolojisi ise 13.56 MHz frekansında, 10 cm'den daha kısa mesafelerde çalışarak temassız ve anlık erişim imkânı sağlamakta; çok kısa operasyonel menzili sayesinde fiziksel güvenliği artırmakta ve elektromanyetik girişim riskini azaltmaktadır. Bu özellikleriyle NFC, enerji verimliliği ve güvenlik gereksinimlerinin ön planda olduğu IoT tabanlı akıllı kilit sistemleri için diğer kablosuz teknolojilere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. NFC tabanlı enerji hasatlama sistemleri, Yeşil IoT ekosisteminin sürdürülebilirlik odaklı dönüşümün ve "Yeşil IoT" vizyonunun temelini oluşturmaktadır. Pilsiz NFC donanımların yaygınlaşması IoT sistemlerinin batarya bağımlılığının ortadan kaldırılması sürecini hızlandırmaktadır.

Bu çalışma, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan çalışan, enerjisini mobil cihazın NFC sinyallerini hasatlayan "Ecokey" akıllı kilit sistemini ve bu sistemin mobil entegrasyon süreçleri sunulmuştur. Bu kapsamda, NTAG 5 Switch kullanılarak RF sinyallerinden hasatlanan enerji; süper kapasitörde depolanmış ve kilit motor sistemini tetiklenmesinde kullanılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, farklı mobil platformlarda enerji aktarım algoritmalarını optimize etmek ve donanım-yazılım entegrasyonu ile pilsiz akıllı kilit sistemlerinin ticari uygulanabilirliğini ortaya koymaktır.

II. LİTERATÜR

NFC teknolojisi, akıllı ödeme sistemlerinden giyilebilir biyosensörlere, endüstriyel varlık izlemeden bataryasız IoT düğümlerine kadar çok geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Bu teknolojiyi kullanan tasarımlarda optimum çalışma verimliliği dört kritik parametre ile sağlanmaktadır. Bunlar: i) maksimum enerji transferinde rezonans frekansı için kapasitör seçimi, ii) okuyucu-etiket arasındaki mesafeye bağlı olarak değişen ve iletişim kalitesini belirleyen kaplin faktörü, iii) düşük güç tüketimli gömülü sistemlerle entegrasyonudur. NFC teknolojisinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar üç ana başlıkta toplanmaktadır; yüksek enerji transferi elde etmek için NFC (13.56 MHz) etiketin rezonans frekansı ve RF enerji hasatlama, [5, 9, 10], etiket ile okuyucu arasındaki mesafe ve anten kazancı [11, 12, 13], NFC uygulamaları için düşük güç tüketimli gömülü sistemlerin entegrasyonudur [14, 15]. NFC teknolojisi sadece veri iletimi değil, aynı zamanda kimlik doğrulama, ödeme sistemleri ve donanım düzeyinde kontrol mekanizmaları için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Literatürde; mobil ödeme ve kart emülasyonu uygulamaları [16, 17, 18, 19], kimlik doğrulama ve erişim kontrolü [20, 21, 22, 23, 24], akıllı ofis/ev uygulamaları [25, 26, 27], ürün kontrolü ve izleme [28, 29, 30, 31], kimya, biyomedikal, gıda, tarım gibi alanlarda kullanılan sensör uygulamaları [9, 32, 33, 34] üzerine çalışmalar bulunmaktadır. NFC' nin kişisel mobil cihazlarla IoT sensörler arasındaki ilk bağlantıda yer alması, kullanıcı etkileşimini basitleştirirken diğer taraftan güvenlik açıklarını azaltmaktadır. Bu yaklaşım, NFC bir tetikleyici veya güvenli başlangıç kanalı olmasını sağlamakta ve daha uzun menzilli kablosuz teknolojilerin (Bluetooth, Wi-Fi) kullandığı sistemlere entegre olmasını kolaylaştırmaktadır.

Akıllı kilit sistemlerinde NFC iletişim teknolojisinin kullanımına yönelik ilk çalışmalarda, cep telefonlarının NFC özelliği kullanılarak kimlik doğrulama sürecine odaklanılmıştır [35, 36, 37, 38]. Özellikle son yıllarda, NFC'nin sadece kimlik doğrulama ve erişim kontrolü için değil, aynı zamanda akıllı kilit mekanizmalarının ihtiyaç duyduğu elektriksel gücün RF sinyallerinden enerji hasatlanarak elde edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [39]. Araştırmacıların yenilikçi pilsiz akıllı kilit sistemleri tasarlama ve geliştirme süreçlerinde özellikle Infineon ve NXP firmalarının NFC tabanlı geliştirme kitleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu geliştirme kitleri ve yonga setleri, pilsiz IoT cihazları geliştirilmesi için donanım düzeyinde enerji dönüşümü optimize edebilecek devre tasarımlarını kolaylaştırmaktadır.

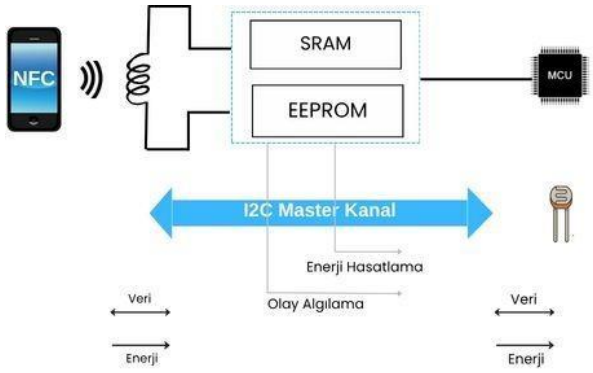
III. MATERYAL METOT

ISO/IEC 18000-3 standardına dayalı NFC teknolojisi, 13.56 MHz frekansında 106-424 kbit/s veri hızlarında 10 cm altında güvenli iletişim sağlamaktadır. NFC yongaları (NXP, Infineon, TI, ST Microelectronics vb.) RF sinyallerinden enerji hasatlayarak, düşük güç tüketimli mikrodenetleyicileri ve sensörleri sürebilmektedir. Okuyucu, RF alanından hasatladığı enerji ile veri iletimi ve kimlik doğrulamayı gerçekleştirmektedir. Dışarıdan bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan bu teknoloji, IoT cihazlarının bakım maliyetlerini düşürerek pil değişimini ortadan kaldırıp ve atık oluşumunun önüne geçmektedir. Bu özelliği dolayısıyla NFC endüstride "yeşil elektronik" akımının stratejik bir bileşeni haline gelmiştir. EcoKey pilsiz akıllı kilit sisteminin prototipi, anlık yüksek güç gerektiren kilit mekanizmasını sürmek amacıyla enerji hasatlama özelliğine sahip NXP Semiconductors firmasının NTAG 5 serisinin NTP5332 yongasının bulunduğu geliştirme kartı üzerinde geliştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. NTAG 5 serisi geliştirme kartı

NTP5332 (NTAG 5 Link) geliştirme kartı NFC özellikli cihazlarla farklı iletişim protokolleri arasında akıllı bir iletişim köprüsü olup sensör donanım tasarımcıları için I²C master/slave, iki adet Darbe Genişlik Modülatörü (PWM) ve genel amaçlı Giriş/Çıkış (General Purpose Input/Output-GPIO) kanalları sunmaktadır. Geliştirme kartı; 13.56 MHz'de NFC Forum Tip 5 standartında olup yakın mesafeden NFC özellikli bir cihaz tarafından ve daha uzun mesafeden ISO/IEC 15693 özellikli bir endüstriyel okuyucu tarafından okunabilir ve yazılabilir özelliklere sahiptir. Tasarımcılar, I²C protokolünü Master/Slave modunda kullanımı ile dış bellek yönetimi ve sensör veri toplama işlemleri yapabilmektedir (Şekil 2).

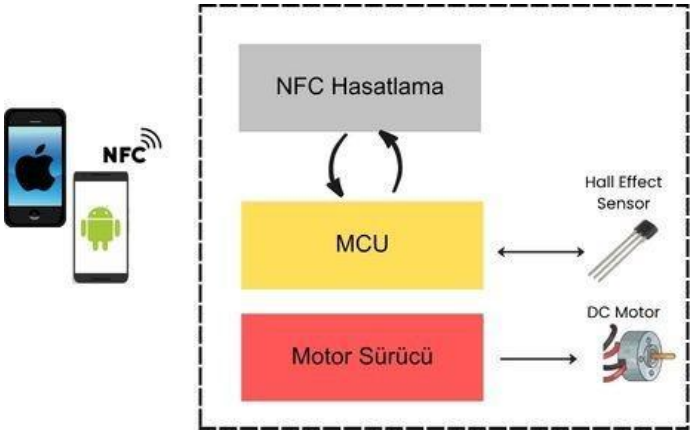


Şekil 2. NTAG 5 serisi geliştirme kart bileşenleri

Sistem tasarımcıları, bu geliştirme kartı aracılığıyla mobil aygıtların NFC sinyallerinden 30 mW' a kadar enerji hasatlayarak (1.8V, 2.4V ve 3V) düşük güç tüketen IoT sensörlerini veya elektronik devreleri besleyebilmektedir. Diğer taraftan, geliştirme kartı üzerinde kullanıcı için EEPROM (2048 byte) ve hızlı veri aktarımı için SRAM (256 byte) bellek bulunmaktadır. Geliştiriciler için bellek alanı; Kullanıcı, Yapılandırma ve SRAM olmak üzere üçe ayrılmıştır.

Kullanıcı Belleği (User Memory), her biri 4 baytlık bloklar olarak düzenlenmiş ve kullanıcı verilerini depolamak için tasarlanmıştır. ***Yapılandırma alanı (Configuration Areas),*** belleğin bu kısmı NFC geliştirme kartının tüm yapılandırma seçenekleri ayrılmıştır. Bu alana yalnızca READ CONFIG veya WRITE CONFIG komutlarıyla erişilebilmektedir. Bu bellek alanında, cihaz başlatıldığında yüklenecek erişim anahtarları, müşteri kimliği (Customer ID) ve orijinallik imzası gibi güvenlik ile ilişkili bilgiler saklanmaktadır. Bu alana erişim tamamen engellenebileceği gibi ilgili bitler ile parola korumalı yapılandırılabilir. ***SRAM (Static RAM),*** hızlı ve sık veri aktarımı için kullanılmaktadır. Bu alana WRITE SRAM ve READ SRAM komutları ile içerik yazılmakta veya okunmaktadır.

Çalışma ile geliştirilen mobil uygulama; enerji hasatlama için NTP5332 ayarlanması, sonrasında elektronik ve mekanik devrenin enerji hasatlama ile sürülmesi ve son adımda ise minimum enerji ile maksimum mekanik gücün elde edilmesidir. EcoKey pilsiz akıllı kilit sisteminin donanım katmanları ve veri/enerji akış diyagramı Şekil 3' te gösterilmektedir.



Şekil 3. EcoKey pilsiz akıllı kilit sistemi

Gömülü sistemin programlama ve mobil uygulama arayüzü tasarımında diğer önemli bir süreç ise enerji hasatlamanın başlatılması ve ne kadar enerji hasatlanacağının belirlenmesidir. Bu aşamada mobil telefonundan alınan RF sinyallerinin (NFC anteninden) enerji hasatlanmasına ilişkin ayarları konfigürasyon yazmaçları ile gerçekleştirilmektedir. Çalışmada kullanılan NTAG 5 Link geliştirme kartında enerji hasadı EH_CONFIG yazmacı ile ayarlanmakta ve kontrol edilmektedir (Tablo 2).

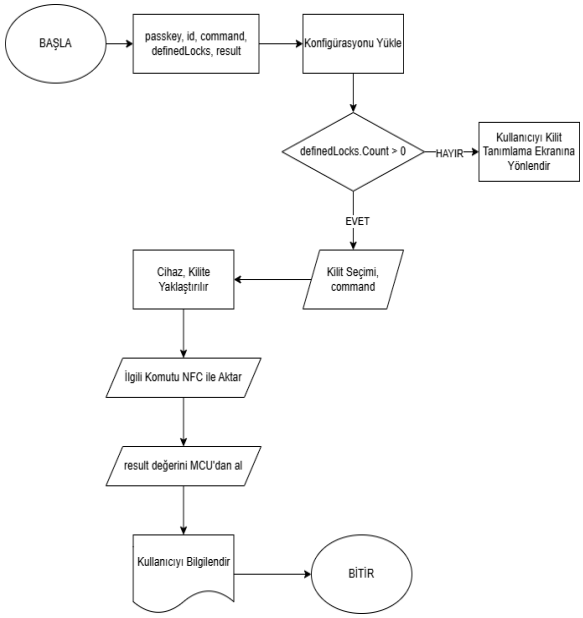
Tablo 2. Enerji hasatlama yapılandırma ayarları ve değerleri [40]

Bit No	Sinyal Adı	Durum	Fonksiyon Açıklaması
Bit 0	EH_ENABLE	0b	Enerji hasatlama pasif
		1b	Enerji hasatlama etkin
Bit 1 Bit 2	EH_VOUT_V_SEL	11b	Rezerv
		10b	3V
		01b	2.4V
		00b	1.8V (Varsayılan)
Bit 3	DISABLE_POWER_CHECK	1b	Güç seviyesi kontrol edilmeden, işlem başlatıldıktan hemen sonra VOUT etkinleştirilir.
		0b	Yeterli güç elde edilebildiği takdirde VOUT etkinleştirilir. (Varsayılan)
Bit 4	EH_VOUT_I_SEL	111b	>12.5mA
		110b	>9mA
		101b	>6.5mA
Bit 5		100b	>4mA
		011b	>2.7mA
Bit 6		010b	>1.4mA
		001b	>0.6mA
		000b	>0.4mA (Varsayılan)
Bit 7	Rezerv		

Enerji hasatlama performansının yüksek olması için kesintisiz (sürekli) bir RF sinyaline ihtiyaç duyulmaktadır ancak mobil telefonlar batarya ömrünü optimize etmek amacıyla standart olarak darbeli RF sinyali yaymaktadır.

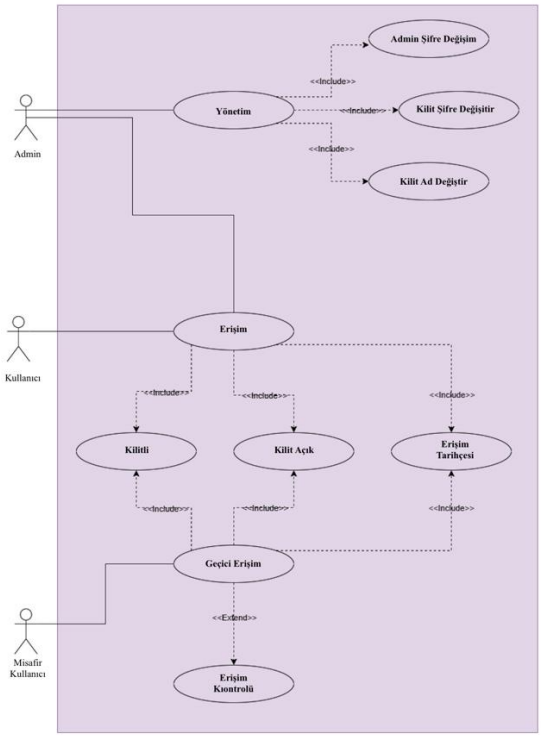
Çalışmamızda kullanılan NTAG 5 serisi için enerji hasatlama ve RF sinyal kontrolü Configuration Bayt alanındaki CONFIG_0 ve EH_CONFIG yazmaçları ile yönetilmektedir. Cihaz başlatıldığında aktif hale gelen CONFIG bitleri sistemin özelleştirilmesini sağlamaktadır. Ön yükleme aşamasının ardından enerji hasatlama sürecini yönetmek için oturum yazmaçlarındaki ilgili bitler kullanılmaktadır. Süreç RF hasatlama mekanizmasını aktifleştiren EH_TRIGGER biti "1b" değerinin atanmasıyla başlar. Ardından, EH_LOAD_OK bitinin durumu gözlemlenerek "1b" değerini alıp almadığı kontrol edilir. Son adımda ise EH_TRIGGER ve EH_ENABLE bitleri "1b" olarak set edilerek ve enerji hasadı başlatılır; alternatif bir yöntem olarak bu iki bitin doğrudan "1b" yapılması ile enerji hasatlama işlemi ile süreç başlatılabilmektedir.

Çalışmanın yazılım geliştirme evresinde hem gömülü sistem hem de mobil uygulama arayüzü kodlanırken EH_ENABLE "0b" ayarlanarak sistemin başlangıçta pasif kalması sağlanmıştır. Kullanıcı mobil uygulama üzerinden kilidi açma komutu verdiğinde ise EH_TRIGGER biti "1b" değerine set edilerek alınan RF sinyallerinin hasatlama mekanizması başlatılır. Şekil 4' de EcoKey pilsiz akıllı kilit sisteminin çalışma algoritması görülmektedir.



Şekil 4. EcoKey mobil uygulama çalışma algoritması

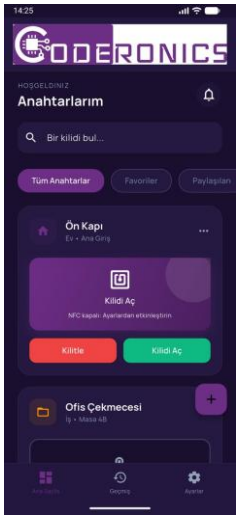
Geliştirilen EcoKey mobil uygulamanın Kullanım Senaryosu (Şekil 5) için yetkili, bireysel, deneme amaçlı olmak üzere üç tip kullanıcı deneyimi sunmaktadır. Mobil uygulamanın cihazınıza kurulum sonrası misafir olarak yazılımı deneyimleme imkanı bulunmaktadır. Kullanıcıların kilit mekanizmasına erişimleri yetkili kullanıcı üzerinden belirlenmektedir.



Şekil. 5. EcoKey mobil uygulama kullanım senaryo diyagramı

Uygulama başlatıldığında; *passkey*, *cihaz kimliği* (id), *komut* (command), *tanımlı kilit listesi* (definedLocks) ve *işlem sonucu* (result) gibi temel parametreler yapılandırılır. Konfigürasyonun tamamlanmasının ardından yerel veri tabanındaki kullanıcı verileri sisteme aktarılır. Uygulama, tanımlı bir kilidin varlığını (definedLocks.Count> 0) denetleyerek kayıtlı bir kilit bulunmaması durumunda kullanıcıyı "Kilit Tanımlama Ekranına" yönlendirir. Tanımlı bir kilit sistemi tespit edildiğinde mobil uygulama arayüzü üzerinden seçim yapılır (Şekil 5). Kullanıcı telefonunu kilit mekanizmasına yaklaştırdığında RF sinyallerinden enerji hasatlama işlemi başlatılır ve kilit mekanizması hedeflenen konuma getirilir. Çalışmamızda kullanılan NTP5332, ilgili yapılandırma yazmaçları set edilerek mobil telefondan çekilen

akımı dinamik olarak sınırlayabilir ve süper kapasitörlerin şarj anında davranışını yazılım ve donanımsal olarak kendi içinde yönetebilir.



Şekil. 5 EcoKey mobil uygulama ekranı

NTAG 5 serisi geliştiricilere standart ISO 7816 APDU komutları yerine ISO/IEC 15693 (NfcV) protokolünü Android Studio platformunda NXP'nin genişletilmiş komut seti ile birlikte ileri özellikleri kullanma imkanı sunmaktadır.

Çalışmada kullandığımız NTP5332 NFC yongasının enerji hasadını maksimuma çıkarmak başka bir deyişle RF alanının sürekliliğini sağlamak için Android tarafında "Read Multiple Blocks" veya NXP' ye özel "Sector Select" komutları döngüye alınmıştır. Her iki yöntemle testler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, NTP5332 NFC yongasının EH_CONFIG yazmacında süper kapasitörümüzün çalışma gerilimine uygun olarak EH_VOUT_V_SEL 1.8 V – 3 V arasındaki değerlere set edilmiştir. Bu aşamada farklı süper kapasitörler değerleri kullanılarak yazılımsal ve donanımsal testler gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, Akım sınırlama yapılarak mobil telefondan hasatlanacak RF sinyalinin sürekliliği ve stabilitesi sağlanmıştır. Bu amaçla Bit 6 (EH_VOUT_I_SEL) 000b - 111b arasında 0.4mA ile 12.5 mA arasında set edilerek EcoKey kilit mekanizması için optimizasyon değerleri elde edilmiştir. Böylece EcoKey akıllı kilit mekanizması için süperkapsitörün optimum sürede (~ 4 sn de 2.8 V) şarj etmesi ve kilit motorunu stabil bir şekilde tetiklemesi sağlanmıştır.

IV. SONUÇLAR

Pilsiz sistemlerin operasyonel performansındaki en kritik faktör, akıllı telefonların NFC sinyallerinden hasatlanabilecek enerji miktarıdır. Literatürde, akıllı telefonların NFC sinyal çıkışlarının yeni elektronik yapılar kullanılarak daha yüksek enerji hasadının mümkün olduğunu ortaya koyulmaktadır. Bu kapsamda, çalışmamız akıllı telefonların IoT ekosisteminde yalnızca birer kontrol aracı olarak değil, aynı zamanda harici cihazlar için doğrudan bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğine yönelik yenilikçi uygulamalara girmektedir. EcoKey akıllı pilsiz kilit sisteminde kullandığımız NTAG5 donanım altyapısı ile entegre mobil uygulama yazılımı ile kilit motorun sürebilecek yeterli düzeyde enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. EcoKey mobil uygulama yazılımı kullanıcıların kilit mekanizmasını kullanım verisi tutmaktadır. Bu durum kilit güvenliği konusunda kullanıcıya takip imkanı vermektedir.

V. TARTIŞMA

Mobil telefonların NFC sinyallerinden enerji hasat ederek çeşitli sensör ve mekanizmaları çalıştırabilen pilsiz IoT sistemleri üzerine yürütülen araştırmalar, gelecekte birçok yeni uygulamanın hayata geçeceğini göstermektedir. Literatürde, esnek hibrit elektronik tasarımların mobil cihazlardan 200 mW gibi yüksek enerji seviyelerine ulaşabildiğini ortaya koyması, bu alandaki inovasyon potansiyelini artırmaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, harici güç kaynağı gerektirmeyen EcoKey akıllı kilit sistemleri gibi pilsiz çözümlerin gelişimini hızlandırırken, harici bir enerji kaynağının temininin zor olduğu alanlarda yenilikçi IoT sensör tasarımları için güçlü bir motivasyon kaynağı oluşturmaktadır.

VI. ÇIKARIM

NFC sinyallerinin hasatlanarak enerji elde edilmesi, mobil telefonların sadece veri iletimi için değil aynı zamanda sensör veya çeşitli mekanizmaların beslenmesi için kullanımı cep telefonları için bir paradigma değişimine yol açacaktır. Böylece, geleneksel IoT senaryolarında mobil telefonlar kontrol ve veri alışverişi işlevi üstlenirken, esnek hibrit elektronik tasarımların artması ile aktif bir enerji kaynağı rolünü de

alabilecektir. Bu inovatif yaklaşım, IoT cihazlarının tasarımında pil veya şebeke bağlantısı gibi hantal ve maliyetli enerji gereksinimlerini ortadan kaldıracaktır. EcoKey gibi inovatif çözümler, endüstri de "tak-çalıştır" (plug-and-play) mantığının "kur-ve-unut" (deploy-and-forget) mantığına dönüşüm sürecini ivmelendirecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1812-Yatırım Tabanlı Girişimcilik Destek Programı (BiGG Yatırım) tarafından 2250233 proje numarası ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] Chataut, R., Phoummalayvane, A., & Akl, R. (2023). Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare, Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0. Sensors, 23(16), 7194. https://doi.org/10.3390/s23167194

[2] S. Cao, X. Chen and B. Yuan, "Overview of Short-range Wireless Communication Protocol," 2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Wuhan, China, 2022, pp. 519-523, doi: 10.1109/ICCCS55155.2022.9846125.

[3] Lazaro, A., Villarino, R., & Girbau, D. (2018). A survey of NFC sensors based on energy harvesting for IoT applications. Sensors, 18(11), 3746.

[4] https://www.newelectronics.co.uk/content/features/the-future-of-nfc

[5] Miranda, V. P., Colombo, D. M., & Monteiro, I. S. (2021). NFC Energy Harvesting using Flexible Hybrid Electronics: An experimental case study. 2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). https://doi.org/10.1109/INSCIT49950.2021.9557245

[6] Boada, M., Lazaro, A., Villarino, R., & Girbau, D. (2021, August). Read range study of energy-harvested implanted NFC sensors with commercial NFC ICs and smartphones. In 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS) (pp. 1-4). IEEE.

[7] Cairó, J. I., Bonache, J., Paredes, F., & Martín, F. (2018). Reconfigurable system for wireless power transfer (WPT) and near field communications (NFC). IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 1(4), 253-259.

[8] Emara, M., Bucciero, A., Catarinucci, L., Grassi, G., & Colella, R. (2025). SPICE-Based Circuit Modelling and Validation of an NFC Energy-Harvesting Strain Sensor for Structural Health Monitoring. IEEE Sensors Journal. "PDCA12-70 data sheet," Opto Speed SA, Mezzovico, Switzerland.

[9] Lazaro, A., Villarino, R., Lazaro, M., Canellas, N., Prieto-Simon, B., & Girbau, D. (2023). Recent advances in batteryless NFC sensors for chemical sensing and biosensing. Biosensors, 13(8), 775.

[10] Monga, D. C., & Halonen, K. (2024, June). A Sub-nW Temperature Invariant Voltage Reference in a Unipolar TFT-based Flexible IC Technology. In 2024 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS) (pp. 1-4). IEEE.

[11] Zhao, Y., Li, H., Naderiparizi, S., Parks, A., & Smith, J. R. (2018). Low-cost wireless power efficiency optimization of the NFC tag through switchable receiver antenna. Wireless Power Transfer, 5(2), 87-96.

[12] Kharchevskii, A., Yusupov, I., Dobrykh, D., Udrov, M., Geyman, S., Grigorovich, Y., ... & Ginzburg, P. (2025). Long-range over-a-meter NFC link budget with distributed large-area coils. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 63, 101327.

[13] Bajaj, C., Kumar, S., Upadhyay, D. K., Kanaujia, B. K., Gupta, D., & Ali, T. (2024). Modern RFID reader antennas: a review of the design, state-of-the-art, and research challenges. IEEE Access, 13, 16427-16443.

[14] Baker, B., Woods, J., Reed, M. J., & Afford, M. (2024). A survey of short-range wireless communication for ultra-low-power embedded systems. Journal of Low Power Electronics and Applications, 14(2), 27.

[15] Analog Devices. (2026). Low-power polling with Maxim secure NFC microcontrollers. https://www.analog.com/en/resources/design-notes/low-power-polling-with-maxim-secure-nfc-microcontrollers.html

[16] Microsoft. (2026) NFC sample homepage on Microsoft Learn. [Online]. Available: https://learn.microsoft.com/en-us/samples/microsoft/windows-universal-samples/nfc/

[17] Ali, A. H., Abouhogail, R. A., Tarrad, I. F., & Youssef, M. I. (2017). A new design of Mobile Payment system based on NFC Technology. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 17(03), 7-18.

[18] Alidadi Shamsabadi, F., & Bakhtiari Chehelcheshmeh, S. (2022). A cloud-based mobile payment system using identity-based signature providing key revocation. The Journal of Supercomputing, 78(2), 2503-2527.

[19] Tafti, F. S. M., Mohammadi, S., & Babagoli, M. (2021). A new NFC mobile payment protocol using improved GSM based authentication. Journal of Information Security and Applications, 62, 102997.

[20] Bispo, B. C., Cunha, N. A., Silva, M. C. B., & Rodrigues, M. A. (2022, October). Batteryless NFC Device for Heart Rate and SpO2 Acquisition. In Latin American Conference on Biomedical Engineering (pp. 465-475). Cham: Springer Nature Switzerland.

[21] Khan, M.A.A., Ali, M.H., Haque, A.K.M.F., Debnath, C., Jabiullah, M.I., Rahman, M.R. (2021). An App-Based IoT-NFC Controlled Remote Access Security Through Cryptographic Algorithm. In: Kaiser, M.S., Xie, J., Rathore, V.S. (eds) Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2020). Lecture Notes in Networks and Systems, vol 190. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0882-7_9

[22] Lu, H. J., & Liu, D. (2021). An improved NFC device authentication protocol. Plos one, 16(8), e0256367.

[23] Szolga, L. A., Arsad, N., & Majumdar, S. (2025). NFC-Based Smart Card Systems for Educational Applications: Design, Implementation, and Integration. International Journal of Education and Information Technologies, 19, 153-159.

[24] Bhanushali, J., Sudha, K. L., Devadiga, C., Khan, T., & Singh, R. (2024, May). Tagd India: NFC Enabled Smart Visiting Card. In 2024 International Conference on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS) (pp. 1-5). IEEE.

[25] Hussain, S. M., Al Shukairi, S. A. H. S., Asuncion, R., & Prabhu, M. (2024). Smart Security: An IoT-NFC Lock System for Efficient Access Management. Malaysian Journal of Science and Advanced Technology, 322-329.

[26] Klee, S., Roussos, A., Maass, M., & Hollick, M. (2020). {NFCGate}: Opening the Door for {NFC} Security Research with a {Smartphone-Based} Toolkit. In 14th USENIX Workshop on Offensive Technologies (WOOT 20).

[27] R.S.Sabeenian, M.Kawin, S.Akshayasri, P.M.Dinesh, M. Alagarsamy and G. P. Lakshmi, "IoT-Based Data Logging System for Authenticated Bank Locker Access to Ensuring Security," 2024 International Conference on Intelligent & Innovative Practices in Engineering & Management (IIPEM), Singapore, Singapore, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/IIPEM62726.2024.10925690

[28] Limin, L. I. U. (2018, May). Smart Control Components and Bicycle Sharing Systems. In 2018 8th International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2018) (pp. 667-670). Atlantis Press.
[29] R. Russel and W. Ibrahimi, "A Batteryless Inductive Energy Harvesting System," Bachelor's thesis, Dept. Electrical Engineering, TU Delft (Delft University of Technology), Delft, The Netherlands, 2025.
[30] Gawade, D. R., Buckley, J., Rather, N., Ziemann, S., Zabeo, A., Barton, J., ... & O'Flynn, B. A Battery-Less NFC Sensor Transponder for Museum Artefact Monitoring.
[31] Nogues, E., Mackowiack, N., Hamdoun, A., & Latrach, M. (2022, July). NFC/RFID sensor tag for wireless temperature monitoring in a cold chain. In 10th International Conference on Innovation, Modern Applied Science & Environmental Studies (ICIES'2022) (Vol. 351, p. 01038).
[32] Bispo, B. C., Cunha, N. A., Silva, M. C. B., & Rodrigues, M. A. (2022, October). Batteryless NFC Device for Heart Rate and SpO2 Acquisition. In Latin American Conference on Biomedical Engineering (pp. 465-475). Cham: Springer Nature Switzerland.
[33] Kassal, P., Steinberg, M. D., & Steinberg, I. M. (2018). Wireless chemical sensors and biosensors: A review. Sensors and Actuators B: Chemical, 266, 228-245.
[34] JosephNg, P. S., BrandonChan, P. S., & Phan, K. Y. (2023). Implementation of smart NFC door access system for hotel room. Applied System Innovation, 6(4), 67.
[35] Goud, K.N., Sindhuri, K. (2022). Enhanced Security for Smart Door Using Biometrics and OTP. In: Gunjan, V.K., Zurada, J.M. (eds) Modern Approaches in Machine Learning & Cognitive Science: A Walkthrough. Studies in Computational Intelligence, vol 1027. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96634-8_47
[36] Jorda, R. L., Coballes, J. R. A., Enriquez, L. A. C., Millan, M. L. S., Mora, A. J., Teodoro, M. N. G., ... & Tolentino, L. K. S. (2018, November). Comparative evaluation of NFC tags for the NFC-controlled door lock with automated circuit breaker. In 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM) (pp. 1-6). IEEE.
[37] Pacheco, J., & Miranda, K. (2020, September). Design of a low-cost NFC door lock for a smart home system. In 2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS) (pp. 1-5). IEEE.
[38] Gadupu, H., Mokharji, O., Kankaria, R., Kumar, S., & Jayavel, K. (2021). ACCESS-IoT enabled smart lock. International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems, 10(3), 176.
[39] Q. Zhu, "Build battery-free smart locks with NFC energy harvesting technology," Infineon Technologies, Tech. Rep. (Whitepaper), 2023. [Online]. Available: https://www.infineon.com/gated/infineon-build-battery-free-smart-locks-with-nfc-energy-harvesting-technology_f08ba9d6-5484-48fa-b4e8-82b43848297b
[40] NXP Semiconductors. (2026) NTAG 5 Development Kits homepage. [Online]. Available: https://www.nxp.com/products/rfid-nfc/nfc-hf/connected-nfc-tags/ntag-5-development-kits:OM2NTX5332.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Python Programlama Eğitiminde RAG Destekli ve Adaptif Öğrenme Tabanlı Sanal Öğretmen Asistanı

Ecenaz Bozdoğan[a], Yerdinat Alikhan[a], Elif Pınar Hacıbeyoğlu[b]*

[a]Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
[b]Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** 220502040@kocaelisaglik.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, kitlesel programlama eğitiminde (MOOCs ve kalabalık sınıflar) artan etkileşim eksikliğini gidermeyi ve mevcut Büyük Dil Modellerinin (LLM) neden olduğu "halüsinasyon" (yanlış bilgi üretme) riskini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen "Sanal Öğretmen Asistanı", RAG (Retrieval-Augmented Generation) mimarisi sayesinde genel internet verisi yerine sadece eğitmen tarafından sağlanan kanonik ders notlarını kullanarak %100 müfredat uyumlu ve güvenilir cevaplar üretir. Sistemin karar mekanizmasında kullanılan Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL) ve Derin Bilgi İzleme (DKT) algoritmaları, öğrencinin bilgi seviyesini anlık olarak analiz ederek kişiye özel dinamik bir öğrenme rotası oluşturur. Ayrıca sistem, öğrenciye doğrudan kod çözümünü vermek yerine Sokratik Yönlendirme stratejisi ile düşündürücü ipuçları sunarak aktif öğrenme sürecini destekler. Prototip geliştirme sürecinde maliyet etkinliği ve performans kriterleri gözetilerek doğal dil işleme katmanı için DeepSeek-V3 büyük dil modeli, OpenAI uyumlu API arayüzü üzerinden kullanılmıştır. Model seçiminde açık ağırlık erişimi, uygun fiyatlı API kullanımı ve güçlü Türkçe anlama kapasitesi belirleyici ölçütler olmuştur. Önerilen bu mimari, hem öğretim asistanlarının operasyonel yükünü hafifletmeyi hem de öğrencilerin Python programlama yetkinliklerini sürdürülebilir ve güvenli bir altyapıda geliştirmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay zeka, RAG, Derin pekiştirmeli öğrenme, Python eğitimi, Sokratik pedagoji.*

Virtual Teacher Assistant Based on RAG and Adaptive Learning in Python Programming Education

ABSTRACT

This study aims to address the growing lack of interaction in mass programming education (MOOCs and crowded classrooms) and to minimize the risk of "hallucination" (generating incorrect information) caused by current Large Language Models (LLMs). The developed "Virtual Teaching Assistant" generates 100% curriculum-aligned and reliable answers by using only instructor-provided canonical lecture notes instead of general internet data, thanks to its RAG (Retrieval-Augmented Generation) architecture. The Deep Reinforcement Learning (DRL) and Deep Knowledge Tracing (DKT) algorithms employed in the system's decision mechanism analyze the student's knowledge level in real-time to create a personalized dynamic learning path. Furthermore, instead of providing direct code solutions, the system supports the active learning process by offering thought-provoking hints through the Socratic Guidance strategy. During the prototype development process, for the natural language processing layer, the DeepSeek-V3 large language model was used via an OpenAI-compatible API interface. Open weight access, affordable API usage, and strong Turkish understanding capabilities were the determining criteria in model selection. This proposed architecture aims to alleviate the operational burden on teaching assistants while enabling students to improve their Python programming competencies within a sustainable and secure infrastructure.

Keywords: *Artificial intelligence, RAG, Deep reinforcement learning, Python education, Socratic pedagogy.*

I. GİRİŞ

Programlama öğrenmek, hem kavramsal hem de sözdizimsel katmanları bir arada gerektirdiğinden dil öğreniminden farklı bir zorluk taşır. Sınıf ortamında öğretmenin aynı anda onlarca öğrenciye bireysel geri bildirim vermesi güçtür; MOOC platformlarında ise tamamlama oranlarının %10'un altında seyrettiği bilinmektedir [1]. Bu durum, öğrenciyle etkileşime girebilen ve bilgi düzeyini bağımsız olarak izleyebilen sistemlere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Literatürde önerilen çözümlerin büyük çoğunluğu tek bir tekniğe dayanmaktadır: ya bilgi izleme modeli ya büyük dil modeli ya da pekiştirmeli öğrenme ajanı. Piech ve diğerlerinin geliştirdiği DKT modeli öğrenci bilgi durumunu olasılıksal biçimde tahmin etmekte [2], RAG tabanlı sistemler ise halüsinasyon riskini azaltarak daha güvenilir ders içeriği sunabilmektedir [3]. Öte yandan Wang ve diğerleri, pekiştirmeli öğrenme ile müfredat sıralamasının öğrenme çıktılarını iyileştirebildiğini göstermiştir [4]. Ancak Türkçe dil desteği sunan, bu üç bileşeni birden kullanan ve sokratik pedagojiyi sisteme entegre eden bir çalışmaya literatürde rastlanmamaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen Sanal Öğretmen Asistanı, söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Sistem; RAG bileşeniyle ders notlarından bağlam getirmekte, LSTM tabanlı DKT modeliyle her öğrenci için konu bazlı bilgi vektörü tutmakta ve DQN ajanıyla sıradaki konuyu dinamik olarak belirlemektedir. Yanıtlar doğrudan verilmek yerine, öğrencinin kendi cevabını bulmasını teşvik eden sokratik yöntemle sunulmaktadır.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde sistem mimarisi açıklanmakta, üçüncü bölümde deneysel kurulum ve değerlendirme protokolü verilmekte, dördüncü ve beşinci bölümlerde sırasıyla sonuçlar ve tartışma yer almakta, altıncı bölümde ise çalışma özetlenmektedir.

II. MATERYAL METOT

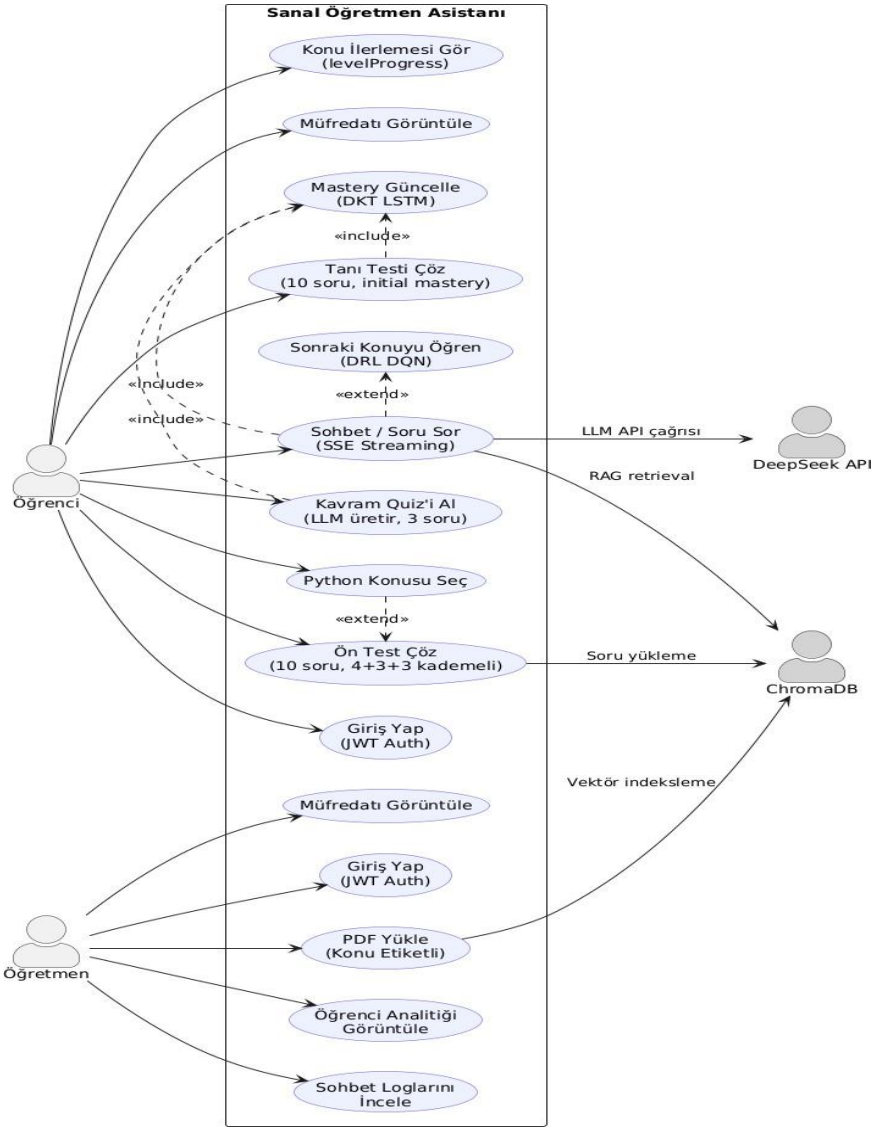
Sistem dört ana bileşenden oluşmaktadır. RAG katmanında öğretmen tarafından yüklenen PDF ders notları 500 karakterlik örtüşen parçalara ayrılmakta, sentence-transformers kütüphanesinin çok dilli MiniLM modeli ile vektöre dönüştürülmekte ve ChromaDB'de saklanmaktadır. Öğrenci soru sorduğunda konu kimliğiyle filtreli retrieval yapılmakta; elde edilen bağlam DeepSeek-V3 modeline iletilerek yanıt üretilmektedir.

DKT katmanı, 10 konu × 128 gizli birimli tek katmanlı bir LSTM ağından oluşmaktadır. Model, 1000 sentetik öğrenci × 25 etkileşim verisiyle eğitilmekte ve öğrenci başarı geçmişinden 0,0–1,0 aralığında mastery skoru tahmin etmektedir. Etkileşim sayısı 10'un altında kaldığında kural tabanlı güncelleme (doğru: +0,05, yanlış: −0,04) devreye girmektedir.

DRL katmanında DQN ajanı LearningEnvironment ortamında eğitilmektedir. Durum, 10 boyutlu mastery vektörüdür; aksiyon, sonraki önerilecek konu indeksidir; ödül ise etkileşim başarısına (+1,0 /−0,5) göre belirlenmektedir. Model mevcut değilse kural tabanlı politika (mastery < 0,7 olan ilk konuyu öner) otomatik olarak aktif olmaktadır.

Sokratik katmanda SocraticManager sınıfı her öğrenci–konu çifti için deneme sayısını izlemekte ve dört kademeli ipucu sistemi uygulamaktadır: genel yönlendirici soru, spesifik yönlendirme, iskelet kod ve son çare olarak tam çözüm. Öğrencinin seviyesine göre başlangıç noktası kalibre edilmektedir: başlangıç seviyesi için Hint 1, orta için Hint 2, ileri için Hint 3.

Ön değerlendirme amacıyla her konu için 10 soruluk kademeli bir ön test uygulanmaktadır. Sorular 4 başlangıç, 3 orta ve 3 ileri olmak üç kademeye ayrılmakta; her kademedeki başarı oranının %60'ı aşması durumunda öğrenci bir üst seviyeye yerleştirilmektedir.



Şekil 1. Otonom sanal öğretmen sistemi kullanıcı senaryo (Use Case) diyagramı

III. SONUÇLAR

DKT Model Performansı. LSTM modeli 300 test öğrencisi üzerinde değerlendirilmiştir (Tablo 1). AUC-ROC = 0,671 değeri rastgele tahminin (0,50) belirgin biçimde üzerinde olmakla birlikte, eğitim verisinin sentetik niteliği göz önünde bulundurulduğunda beklenen bir aralıkta kalmaktadır.

Tablo 1. DKT LSTM model performans metrikleri

Metrik	**Değer**
AUC-ROC	0,671
Binary Cross-Entropy	0,600
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,219
RMSE	0,268

Strateji Karşılaştırması. 200 sanal öğrenci × 300 adım boyunca üç politika karşılaştırılmıştır (Tablo 2). DQN ajanı kural tabanlı politikadan %12,2 daha yüksek ortalama mastery üretmiştir.

Tablo 2. Adaptasyon Stratejisi Ablation Çalışması

Strateji	**Ort. Final Mastery**
Sıralı (baseline)	0,317
Kural Tabanlı	0,278
DRL (DQN)	0,312

Persona Simülasyonu. Başlangıç mastery'si 0,10 olan Ali profiliyle 0,49 olan Ayşe profili 60 adım boyunca simüle edilmiştir. Sistem, Ayşe'nin temel konularını güçlendirirken Ali'ye farklı bir konu sıralaması önermiş; iki profil arasında belirgin strateji farklılığı gözlemlenmiştir.

IV. Tartışma

DKT modelinin AUC değeri, benzer sentetik veri kullanan çalışmalarla kıyaslandığında makul bir aralıkta kalmaktadır; gerçek öğrenci verisiyle eğitilen modellerin 0,80'e yaklaştığı görülmektedir [2]. Bu fark, çalışmanın temel kısıtını oluşturmakta olup mevcut sistemde kural tabanlı güncellemenin neden daha güvenilir davrandığını da açıklamaktadır.

DQN politikasının kural tabanlı politikayı geride bırakması, ajanın eğitim sırasında anlamlı bir strateji geliştirdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte mutlak mastery değerlerinin düşük kalması, kullanılan simülasyon ortamının bir sınırlamasından kaynaklanmaktadır: LearningEnvironment'ta öğrencinin başarı olasılığı doğrudan mastery skoru olarak modellenmekte, öğretim etkisi hesaba katılmamaktadır. Bu durum, Pu ve diğerlerinin ortam kalibrasyonuna ilişkin bulgularıyla örtüşmektedir [4].

Persona simülasyonu, kişiselleştirme mekanizmasının işlediğini ortaya koymaktadır; aynı içeriğe ve aynı politikaya maruz kalan iki profil sistematik biçimde farklı öğrenme yolları izlemiştir. Türkçe dil desteği ile sokratik ipucu entegrasyonunun bir arada sunulduğu bu tür bir sistemin, özellikle Türkçe programlama eğitimi bağlamında mevcut bir boşluğu kapattığı değerlendirilmektedir.

V. Çıkarım

Bu çalışmada RAG, DKT ve DRL bileşenlerini sokratik pedagojiyle birleştiren Türkçe bir adaptif Python öğretim sistemi geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. LSTM tabanlı bilgi izleme modeli sentetik veride AUC = 0,671 ile rastgele tahminin belirgin biçimde üzerinde performans gösterirken, DQN politikası kural tabanlı yaklaşıma kıyasla %12,2 daha yüksek bilgi edinimi sağlamıştır. Sistem, farklı profillere sahip öğrencilere farklı stratejiler uygulayabildiğini persona simülasyonuyla doğrulamıştır.

Gerçek öğrenci verisiyle yeniden eğitim, ortam kalibrasyonunda öğretim etkisinin modellenmesi ve IRB onaylı kullanıcı çalışması gelecek çalışmaların öncelikli gündem maddeleri olarak belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi bünyesinde yürütülmüştür.

Kaynaklar

[1] N. Brown, P. Weill-Tessier, J. Leinonen, P. Denny, and M. Kölling, "Howzat? Appealing to expert judgement for evaluating human and AI next-step hints for novice programmers," ACM Transactions on Computing Education, 2024.

[2] T. Gervet, K. Koedinger, J. Schneider, and T. M. Mitchell, "When is deep learning the best approach to knowledge tracing?" Journal of Educational Data Mining, vol. 12, no. 3, pp. 31–54, 2020.

[3] A. K. Goel and L. Polepeddi, "Jill Watson: A virtual teaching assistant for online education," in Learning Engineering for Online Education, Routledge, pp. 120–143, 2018.

[4] W. Hoiles and M. Schaar, "Bounded off-policy evaluation with missing data for course recommendation and curriculum design," in Proc. International Conference on Machine Learning (ICML), 2016.

[5] M. Kazemitabaar, X. Hou, A. Henley, B. Ericson, D. Weintrop, and T. Grossman, "How novices use LLM-based code generators to solve CS1 coding tasks in a self-paced learning environment," in Proc. European Conference on Modelling and Simulation, 2023.

[6] R. L. Kumar, "Active learning framework for Python programming," International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), vol. 6, no. 2, 2024.

[7] S. Minn, Y. Yu, M. C. Desmarais, F. Zhu, and J.-J. Vie, “Deep knowledge tracing and dynamic student classification for knowledge tracing,” in Proc. 2018 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), pp. 1182–1187, 2018.
[8] Y. Pu, C. Wang, and W. Wu, “A deep reinforcement learning framework for instructional sequencing,” in Proc. 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), pp. 5456–5461, 2020.
[9] S. J. Sakib, B. K. Joy, Z. Rydha, M. Nuruzzaman, and A. A. Rasel, “Virtual teaching assistant for undergraduate students using natural language processing & deep learning,” AIP Conference Proceedings, vol. 2898, no. 1, 2024.
[10] S. Vinayakumar, S. Ashwani, and M.-T. Vo-Thanh, “AI can look up StackOverflow too: Retrieval-augmented code generation,” arXiv preprint arXiv:2307.xxxx, 2023.
[11] K. Wang, J. Ramos, and R. Lawrence, “ChatEd: A chatbot leveraging ChatGPT for an enhanced learning experience in higher education,” arXiv preprint arXiv:2401.00052, 2023.
[12] T. Wang, D. V. Díaz, C. Brown, and Y. Chen, “Exploring the role of AI assistants in computer science education: Methods, implications, and instructor perspectives,” arXiv preprint arXiv:2306.03289, 2023.
[13] Z. Z. Wang, A. Asai, X. V. Yu, F. F. Xu, Y. Xie, G. Neubig, and D. Fried, “CodeRAG-Bench: Can retrieval augment code generation?” in Proc. 2024 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, 2024.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Kaba Tel Çekme Sisteminden Çıkan Değerli Atığın Mekanik ve Kimyasal Hibrit Yaklaşımlarla Dizayn Edilen Sistem Kullanılarak Geri Kazanılması

Engin Büyüktarakcı[a], Yaşar Karadal[a], Gökhan Ceyhan[b]*

[a]Seval Kablo Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Denizli/Türkiye.
[b]Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kahramanmaraş/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** enginbuyuktarakci@sevalkablo.com

ÖZET

Kaba tel çekme proseslerinde kullanılan emülsiyon sistemleri, üretim sırasında önemli miktarda bakır içeren çamur atıkları oluşturmaktadır. Bu atıklar, hem ekonomik açıdan değerli metal kaybına hem de çevresel açıdan bertaraf maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, kaba tel çekme sisteminden kaynaklanan bu değerli atığın geri kazanımına yönelik mekanik ve kimyasal yöntemlerin entegre edildiği hibrit bir proses tasarımı ele alınmıştır. Önerilen sistemde, öncelikle mekanik ayırma yöntemi ile katı-sıvı faz ayrımı gerçekleştirilmekte, ardından kimyasal işlemler ile sıvı fazın etkin şekilde ayrıştırılması ve bakırın yüksek saflıkta geri kazanılması hedeflenmektedir. Geliştirilen hibrit sistemin performansı, laboratuvar ve pilot ölçekli denemelerle optimize edilmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında XRD, XRF ve ICP-MS analizleri kullanılarak geri kazanılan ürünün saflık derecesi, faz bileşimi ve elementel dağılımı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, mekanik santrifüj ve kimyasal flokülasyon ardışık prosesinin bakır çamurundaki emülsiyon kontaminasyonunu %98,5 oranında giderdiğini ve ağırlıkça %99,12 saflıkta elementel bakır/bakır oksit kompozit tozu eldesine imkan tanıdığı belirlenmiştir. Bu çalışma, kablo endüstrisinde tehlikeli atık sınıfındaki bakır çamurlarının katma değerli bir hammaddeye dönüştürülerek döngüsel ekonomi modeline kazandırılması açısından özgün ve ticari uygulanabilirliği yüksek bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Atık Yönetimi, Bakır Geri Kazanımı, Döngüsel Ekonomi, Hibrit Sistem, Kaba Tel Çekme*

Recovery of Valuable Waste Generated from Rod Breakdown Systems Using a System Designed with Mechanical and Chemical Hybrid Approaches

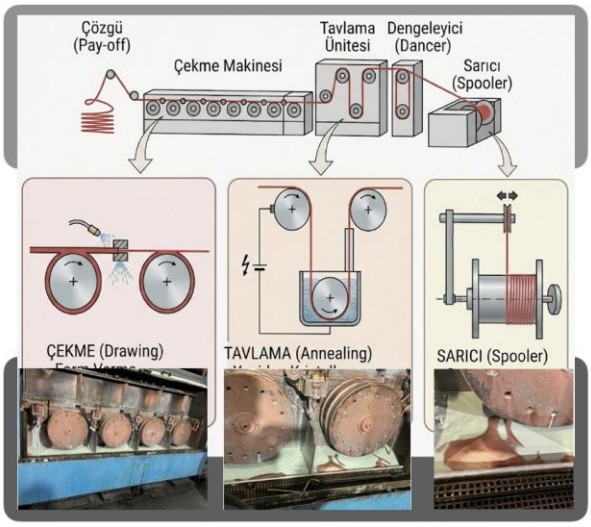
ABSTRACT

Emulsion systems used in coarse wire drawing processes generate copper-rich sludge wastes during manufacturing. These wastes lead to both the loss of economically valuable metals and increased environmental disposal costs. In this study, a hybrid process design integrating mechanical and chemical methods for the recovery of this valuable waste originating from the coarse wire drawing system was evaluated. In the proposed system, solid-liquid phase separation is first performed by mechanical separation, followed by chemical treatments to effectively separate the liquid phase and recover copper with high purity. The performance of the developed hybrid system was optimized through laboratory and pilot-scale trials. In characterization studies, the purity level, phase composition, and elemental distribution of the recovered product were investigated in detail using XRD, XRF, and ICP-MS analyses. The results indicated that the sequential process of mechanical centrifugation and chemical flocculation removed the emulsion contamination in the copper sludge by 98.5% and enabled the production of elemental copper/copper oxide composite powder with a purity of 99.12% by weight. This study presents a novel and highly commercially viable approach for converting hazardous copper sludge into a value-added raw material in the cable industry, integrating it into the circular economy model.

Keywords: *Circular Economy, Copper Recovery, Hybrid System, Wire Drawing, Waste Management.*

I. GİRİŞ

Endüstriyel imalat sektöründe metal işleme, kablo üretimi ve bakır tel çekme prosesleri, küresel bakır ekosisteminin en kritik basamaklarını oluşturmaktadır (Şekil 1). Bu prosesler esnasında, 8 mm çapındaki bakır filmaşinin mekanik olarak matrislerden geçirilerek çapının küçültülmesi işlemi, çok yüksek sürtünme kuvvetleri ve buna bağlı olarak termal gerilimleri beraberinde getirmektedir. Oluşan bu yüksek ısıl yükün sönümlenmesi, matrislerin ve tel yüzeyinin yağlanması ile aşınmanın minimuma indirilmesi amacıyla su-yağ esaslı emülsiyon sıvıları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak kesme, sürtünme ve yüksek hızda şekillendirme döngüsü sırasında, mikron ve nano ölçekli bakır partikülleri, metal tozları ve iyonları sürekli olarak soğutma sıvısına karışmaktadır. Zamanla emülsiyon termal ve mekanik olarak deşifre olmakta, yabancı hidrolik yağlar, surfaktan bozunma ürünleri ve askıda katı maddeler ile kontamine olarak "bakır çamuru" adı verilen, arıtılması ve yönetilmesi son derece güç endüstriyel tehlikeli atık akımlarını meydana getirmektedir.



Şekil 1. Endüstriyel kablo imalatında kaba tel çekme, tavlama ve sarıcı hatları genel proses akışı

Literatür incelendiğinde, bu tür emülsiyon içerikli metal çamurlarının arıtımı ve değerli metallerin geri kazanılması amacıyla akademik ve endüstriyel boyutta birçok yöntemin araştırıldığı görülmektedir. Erken dönem çalışmalarda referans [1]'de, yağ emülsiyonları ve çözünmüş bakır içeren kompleks atıksular için polielektrolit ilavesiyle emülsiyon kırma ve ardından kalsiyum sülfür (CaS) kullanarak bakırı seçici bir şekilde bakır sülfür formunda çöktürmeye dayalı iki aşamalı bir reaksiyon mekanizması kurgulamışlardır. Benzer şekilde referans [2], metal oksit ve hidroksit çamurlarından bakır başta olmak üzere ağır metallerin geri kazanılmasının, hem hammadde bağımlılığını azaltacak ekonomik bir değer yarattığını hem de nihai bertaraf maliyetlerini radikal şekilde düşürdüğünü savunmuştur. Yazar, ortama eklenecek uygun flokülant ve yüzey aktif maddelerin, faz ayırma kinetiğini kayda değer ölçüde artırdığını deneysel olarak ortaya koymuştur.

İlerleyen yıllarda proseslerin termal ve elektrokimyasal entegrasyonuna odaklanılmıştır. Referans [3] ve [4], bakır tel çekme hatlarından kaynaklanan ömrünü tamamlamış soğutma yağı emülsiyonlarının yönetimi için, emülsiyon ayrımını takiben yağ fazının termokatalitik oksidasyonunu ve sulu fazda kalan bakır iyonlarının elektrokimyasal indirgenme proseslerini içeren kombine yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Membran teknolojilerinin endüstriye entegre olmasıyla birlikte referans [5] ve [6], yağ/su emülsiyonlarının konsantre edilmesi ve metal içerikli atıkların saflaştırılmasında ultrafiltrasyon (UF) ve ters ozmoz (RO) membran kombinasyonlarının yüksek ayırma verimliliklerine ulaştığını raporlamışlardır. Ancak bu çalışmalarda, metal askıda katı maddelerinin membran yüzeyinde oluşturduğu yoğun kek tabakası ve yağ bazlı membran kirlenmesi problemi, prosesin sürekli kılınabilmesinin önündeki en büyük bariyer olarak tanımlanmıştır. Referans [7]' de benzer bir yaklaşımla atık emülsiyonların UF/mikrofiltrasyon (MF) membranları ile arıtım olanaklarını incelemiş ve metal işleme sıvılarının karmaşık yapısının membran ömrünü sınırladığını belirtmiştir.

Son dönem literatüründe ise sürdürülebilirlik, düşük enerji tüketimi ve döngüsel ekonomi entegrasyonu ön plana çıkmaktadır. Referans [8], atık yağ emülsiyonlarından sürdürülebilir yöntemlerle yağ ve suyun geri kazanılmasını çalışırken, referans [9] ise tel imalatı atık sularında çözünmüş veya kolloidal halde bulunan bakır türleri için kimyasal koagülasyon, çöktürme, flokülasyon, berraklaştırma ve derin yataklı filtrasyon adımlarını içeren entegre fizikokimyasal arıtma sistemlerinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Alternatif olarak referans [10], kesme yağı/su emülsiyonlarının mikrodalga destekli katalitik ıslak peroksit oksidasyonu (CWPO) ile mineralize edilmesini araştırarak ileri oksidasyon proseslerinin matris kırma verimini incelemişlerdir. Metal spesifik ayırma teknolojilerinde referans [11], emülsiyon sıvı membran (ELM) tekniği kullanarak endüstriyel atıksulardan bakır ve nikelin eş zamanlı ve yüksek seçicilikle ekstraksiyon mekanizmalarını modellemişlerdir. Son olarak referans [12] tarafından yayınlanan kapsamlı çalışmada, metal işleme sıvıları ve yağlı atıksuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik hibrit yöntemlerle arıtım süreçlerinin tasarımı ve tesis ölçekli parametreleri özetlenmiştir. Referans [13] ise soğuk haddeleme ve tel çekme uygulamalarından çıkan atık emülsiyonların UF/NF entegre süreçleriyle arıtılarak suyun ve yağ fazının yeşil imalat prensipleri çerçevesinde yeniden kullanım potansiyelini doğrulamışlardır.

Bu çalışmanın amacı, Seval Kablo bünyesindeki kaba tel çekme hatlarından çıkan, yüksek oranda yağlı emülsiyon sıvısı ile kontamine olmuş, bertarafı yüksek maliyet gerektiren tehlikeli bakır çamuru atığından, mekanik ve kimyasal yöntemlerin sinerjik bir biçimde bir araya getirildiği özgün bir hibrit sistem tasarımı ile yüksek saflıkta elementel/oksit formda bakır tozu geri kazanmaktır. Geliştirilen bu sistem, saf membran proseslerindeki tıkanma bariyerlerini, dizayn edilen dekantör santrifüj mekanik ön giderimi ve optimize edilmiş kimyasal flokülasyon reaksiyon ardışıklığı ile aşmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen ürünlerin elementel ve faz karakterizasyonları yapılarak, döngüsel ekonomiye uygun hammadde standartları doğrulanmıştır.

II. Materyal Metot

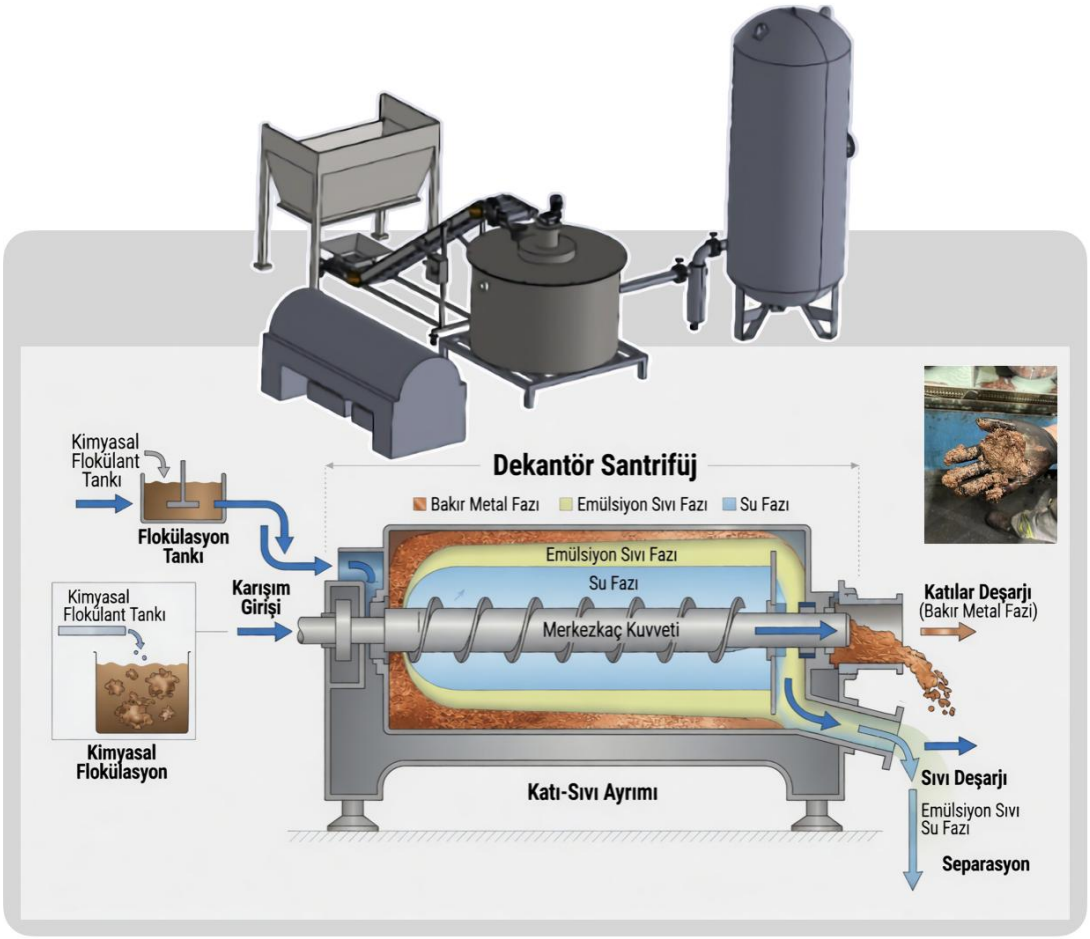
Bu çalışmada, kaba tel çekme prosesinde oluşan yüksek bakır içerikli emülsiyon atık çamurunun geri kazanımına yönelik hibrit bir proses sistemi tasarlanmış ve sistem performansının değerlendirilmesine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistemde, dekantör santrifüj temelli mekanik ayırma prosesi ile flokülant destekli kimyasal arıtma prosesi birlikte ele alınmış; bakır bakımından zengin katı fazın geri kazanılması, sıvı fazın iyileştirilmesi ve atık yükünün azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında proses parametrelerinin geri kazanım verimi üzerindeki etkileri incelenmiş ve sistemin endüstriyel uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan bakır çamuru atığı, Seval Kablo Denizli üretim tesislerinde işletilen kaba tel çekme makinesinin emülsiyon filtrasyon havuzlarından periyodik olarak numunelenmiştir. Alınan ham atık; koyu yeşil ve kahverengi renkte, viskoz, tiksotropik davranış gösteren ve yapısında ağırlıkça yüksek oranda su, mineral esaslı sentetik tel çekme yağı, surfaktanlar ve metalik bakır parçacıkları barındıran kompleks bir çamur formundadır. Kimyasal işlemler aşamasında emülsiyon kırma ve faz kararlılığını bozma amacıyla yüksek saflıkta sülfürik asit (H_2SO_4, %98, Sigma-Aldrich), flokülasyon adımında ise ticari anyonik poliakrilamid (PAM) tabanlı polielektrolit çözeltileri kullanılmıştır.

A. Prototip Sistem Tasarımı

Bu çalışma kapsamında, kaba tel çekme prosesinde oluşan yüksek bakır içerikli emülsiyon atık çamurunun geri kazanımına yönelik hibrit yapıda bir prototip sistem tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Geliştirilen sistemde, mekanik ayırma ve kimyasal arıtma proseslerinin birlikte çalışabileceği modüler bir proses altyapısı oluşturulması hedeflenmiştir. Sistem tasarımında temel amaç; emülsiyon yapısındaki atık çamurun kontrollü şekilde işlenmesi, bakır bakımından zengin katı fazın sıvı fazdan ayrılması ve sıvı fazın ileri arıtma çalışmalarına uygun hale getirilmesidir.

Mekanik ayırma kademesi (dekantör prosesi)'dir. Ham bakır çamuru, bünyesindeki serbest ve zayıf bağlı su-yağ emülsiyon fazının uzaklaştırılması amacıyla yüksek devirli ve sürekli beslemeli bir dekantör sistemine beslenmiştir. Tasarlanan prototip sistem; besleme tankı, karıştırma ünitesi, transfer pompası, dekantör santrifüj sistemi, sıvı faz toplama tankı ve kimyasal arıtma ünitesinden oluşmaktadır. Sistem genel görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Sistem tasarımında atık çamurun heterojen yapısı dikkate alınmış ve özellikle yoğun katı partikül içeren akışkanların pompalanabilirliğini koruyacak ekipman seçimine önem verilmiştir. Bu kapsamda besleme tankında sürekli karıştırma sağlanarak çamurun homojen yapıda tutulması hedeflenmiştir. Bu aşamada uygulanan kuvvet yardımıyla, yoğunluğu yüksek olan metalik bakırca zengin katı faz ile organik-sulu sıvı emülsiyon fazı kütlesel olarak birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 2. Dizayn edilen hibrit sistem (Seval Kablo)

Dekantör santrifüj ünitesi, yoğunluk farkı prensibine dayalı olarak çalışacak şekilde sisteme entegre edilmiştir. Tasarım aşamasında tambur devri, diferansiyel hız, besleme debisi, çamur yoğunluğu ve katı madde oranı gibi parametrelerin proses performansı üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır. Ayrıca sistemin ilerleyen çalışmalarda farklı proses koşullarına uyarlanabilir olması amacıyla kontrol edilebilir ve değiştirilebilir işletme parametrelerine sahip olması hedeflenmiştir.

Kimyasal arıtma ünitesi ise mekanik ayırma sonrasında elde edilen sıvı fazın flokülant destekli arıtma çalışmalarında kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu bölümde flokülant dozajı, karıştırma hızı, çökelme süresi ve pH gibi parametrelerin kontrollü olarak uygulanabileceği deneysel bir altyapı oluşturulmuştur. Böylece sistem yalnızca katı faz geri kazanımına değil, aynı zamanda sıvı fazın iyileştirilmesine yönelik çalışmaların da gerçekleştirilebileceği bütünleşik bir yapıda tasarlanmıştır.

Tasarım sürecinde sistemin endüstriyel uygulanabilirliği, proses sürekliliği, bakım kolaylığı, modüler kullanım yapısı ve ölçeklenebilirliği dikkate alınmıştır. Ayrıca geri kazanılan katı fazın yüksek bakır içeriğine sahip olması ve sıvı fazın yeniden kullanım potansiyelinin değerlendirilebilmesi amacıyla proses akışının minimum ikincil atık oluşturacak şekilde planlanmasına özen gösterilmiştir.

B. Ayrıştırma Çalışmaları

Prototip sistemin kurulmasının ardından, kaba tel çekme prosesinden elde edilen emülsiyon atık çamuru Şekil 3'de gösterilmiş olup üzerinde ayrıştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar kapsamında atık çamurun sistem içerisindeki davranışı incelenmiş, mekanik ayırma performansı değerlendirilmiş ve sistem parametrelerinin katı-sıvı faz ayrımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Denemelerde kullanılan emülsiyon atık çamuru, proses öncesinde homojenizasyon amacıyla karıştırılmış ve besleme tankı içerisinde kontrollü şekilde sisteme verilmiştir.

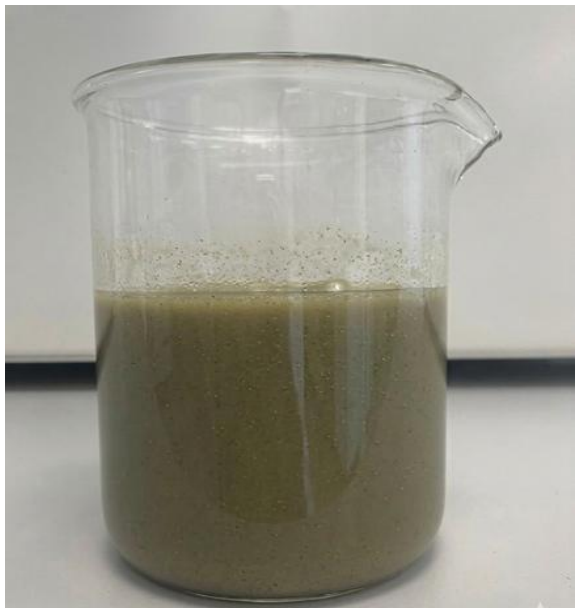


Şekil 3. Emülsiyonlu atık çamur (Seval Kablo)

Ayrıştırma işlemleri, dekantör temelli mekanik ayırma prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Proses sırasında merkezkaç kuvveti etkisiyle yoğunluğu yüksek olan metalik partiküller ve bakır oksit içerikli katı faz, sıvı fazdan ayrıştırılmıştır. Denemeler boyunca besleme debisi, tambur devri, diferansiyel hız ve çamur yoğunluğu gibi proses parametreleri göz önünde bulundurularak sistemin kararlı çalışma koşulları değerlendirilmiştir. Ayrıştırma işlemi sonucunda bakır bakımından zengin katı faz ile sıvı ağırlıklı faz ayrı fraksiyonlar halinde elde edilmiştir.

Elde edilen katı fazın yüksek miktarda metalik bakır ve bakır oksit içerdiği gözlemlenmiş, sıvı fazın ise su, yağ, ince partiküller ve askıda katı maddeler içeren emülsiyon karakterini koruduğu belirlenmiş olup Şekil 4'te katı ve sıvı faz görsellerine yer verilmiştir. Ayrıştırma sonrası elde edilen her iki faz ayrı kaplarda toplanarak karakterizasyon ve analiz çalışmalarında kullanılmak üzere muhafaza edilmiştir. Gerçekleştirilen bu denemeler ile geliştirilen prototip sistemin, kaba tel çekme prosesinden kaynaklanan emülsiyon atık çamurunun fazlarına ayrıştırılmasında teknik olarak uygulanabilir olduğu görülmüştür.

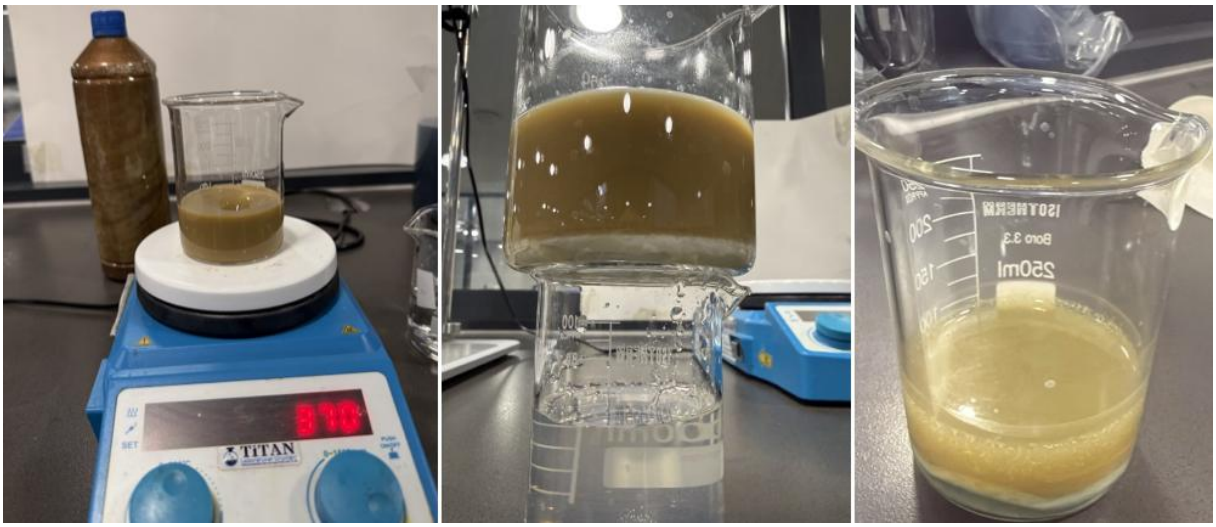




(a) (b)

Şekil 4. Ayrıştırılmış emülsiyon çamurunun (a) katı fazı (b) sıvı fazı

Mekanik işlem sonrasında elde edilen ve yüzeyinde kararlı ince bir yağ filmi barındıran sıvı faz, bir behere alınmıştır. Burada emülsiyon kalıntılarını kırmak ve bakır yüzeyini tamamen serbestleştirmek amacıyla asidik faz ayarı (pH 3) yapılmış ve ardından optimize edilmiş dozajda anyonik polielektrolit eklenerek manyetik karıştırıcıda 370 rpm'de 2 dakika hızlı karıştırma, 40 rpm'de 5 dakika oda sıcaklığında yavaş karıştırma prosesine tabi tutulmuştur. Aglomere olan ve emülsiyondan tamamen arınan ağır bakır partikülleri dipte çöktürülmüş, üst faz (filtrat/yağlı su) dekante edilerek sistemden uzaklaştırılmıştır. Elde edilen saf bakır çökeltisi deiyonize su ile yıkanmış ve 105 °C'de 4 saat vakumlu etüvde kurutularak analizlere hazır hale getirilmiş olup ilgili proses görsellerine Şekil 5'te yer verilmiştir.



Şekil. 5 Mekanik ayırma sonrası sıvı fazın karıştırma, flokülant enjeksiyonu ve laboratuvar ölçekli katı-sıvı ayrışım kademeleri

C. Karakterizasyon ve Analiz

Geri kazanılan bakır tozlarının faz bileşimlerinin, kristal yapılarının ve elementel saflık derecelerinin tespiti amacıyla gelişmiş karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Katı faz analizleri kapsamında; numunelerin kristalografik yapısı GNR APD PRO 2000 model X-Işını Difraktometresi (XRD) ile CuK_α radyasyonu (lambda = 1,54059 Å, 40 kV gerilim ve 30 mA akım parametrelerinde, 2θ=5-95° tarama aralığında) incelenmiştir. Toz numunelerin kantitatif elementel bileşimi Bruker S8 TIGER model dalga boyu dağılımlı x-ışını floresan spektrometresi (WDXRF) cihazıyla belirlenmiştir. Proses çıktılarında ve eser miktardaki sıvı faz kalıntılarında yer alan bakır ve diğer olası safsızlık metal iyonlarının (Fe, Ni, Zn) kesin konsantrasyon tayini ise numunelerin sülfürik asit/nitrik asit matrisinde mikrodalga çözündürme işlemine tabi tutulmasının ardından Agilent 7800 model endüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

XRD analizleri, numunelerin kristal faz yapısının ve içerdiği bileşenlerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen katı faz numunesine, Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM) bünyesinde bulunan GNR APD PRO 2000 model cihaz kullanılarak XRD analizi uygulanmıştır. Analizler CuK_α radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, kullanılan X-ışınının dalga boyu 1,54059 Å'dur. Ölçümler, 2θ=5-95° tarama aralığında ve her açı değeri için 3 saniye integrasyon süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ICP-MS analizleri, numunelerde bulunan metal elementlerin hassas konsantrasyonlarının belirlenmesi ve geri kazanım performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen katı ve sıvı faz numunelerine, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Üniversite-Sanayi-Kamu İşbirliği Geliştirme, Uygulama ve Araştırma Merkezi (ÜSKİM) bünyesinde bulunan Agilent 7800 model ICP-MS cihazı kullanılarak analiz uygulanmıştır. Analizler EPA Method 200.7 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve numunelerdeki metal bakır konsantrasyonları detaylı olarak belirlenmiştir.

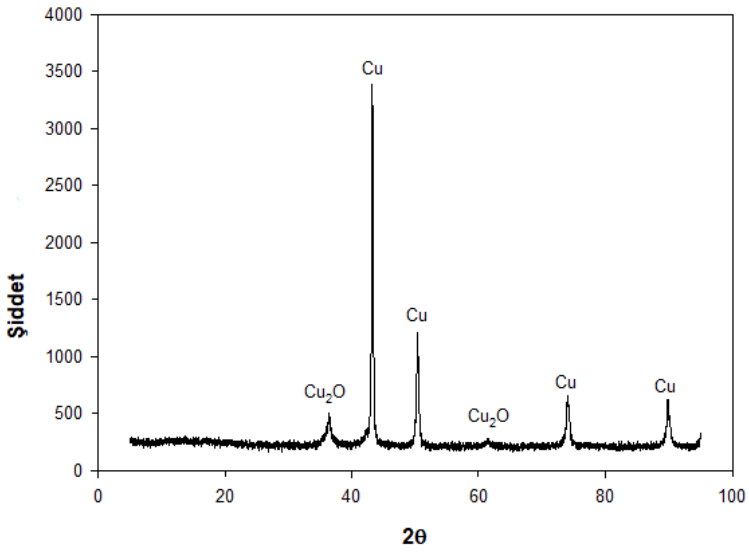
XRF analizleri, numunelerin elementel bileşiminin belirlenmesi ve geri kazanılan fazlardaki metal içeriklerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen katı ve sıvı faz numunelerine, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Üniversite-Sanayi-Kamu İşbirliği Geliştirme, Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Bruker S8 TIGER model XRF cihazı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ile numunelerin elementel içerikleri belirlenmiş ve özellikle bakır konsantrasyonları değerlendirilmiştir.

III. SONUÇLAR

Mekanik ve kimyasal hibrit yaklaşımlarla geri kazanılan bakır tozunun kristal faz analizine ait XRD difraktogramı incelenmiş ve elde edilen piklerin faz dağılımları literatür verileriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. XRD analiz sonuçlarına ait difraktogram Şekil 6'da verilmiştir.

XRD difraksiyon kalıbında, metalik bakırın (Cu) yüzey merkezli kübik (fcc) kristal yapısına ait karakteristik yansımalar net bir şekilde tespit edilmiştir. Spesifik olarak, 2θ=43, 32°, 50, 45° ve 74, 12° açılarında gözlenen yüksek yoğunluklu ve keskin pikler, sırasıyla elementel bakırın (111), (200) ve (220) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir (JCPDS Card No. 04-0836). Bu keskin pik yapısı, uygulanan mekanik dekantasyon ve kimyasal yüzey temizleme adımlarının ardından elde edilen elementel bakırın oldukça yüksek bir kristaliniteye sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, 2θ= 36,45° ve 61,38° konumlarında daha düşük şiddette sekonder pikler kaydedilmiştir. Bu yansımalar, kübik yapıdaki bakır (I) oksit (Cu_2O, kuprit) fazının (111) ve (220) düzlemleri ile doğrudan eşleşmektedir (JCPDS Card No. 05-0667). Sistemde Cu_2O fazının varlığı iki temel mekanizma ile açıklanabilmektedir: Birincisi, kaba tel çekme prosesi esnasında filmaşin çapının küçültülmesi sırasında meydana gelen aşırı sürtünme ve lokal sıcaklık artışlarının, havalı emülsiyon ortamında bakır yüzeyinde kısmi termal oksidasyonu tetiklemesidir. İkincisi ise, geri kazanım prosesinin kurutma aşamasında, nano/mikron ölçekli aktif bakır partiküllerinin yüzeyinde çok ince bir doğal oksit filminin oluşmasıdır. Yapıda kararlı ve çözünmeyen Cu_2O fazının bulunması, kablo imalatı ve metalürjik ergitme süreçlerinde bir dezavantaj oluşturmamakta, aksine malzemenin fırın içi redüksiyon kabiliyetini desteklemektedir. Difraktogram genelinde herhangi bir organik emülsiyon kirliliğine veya amorf genişlemeye rastlanmaması, geliştirilen hibrit sistemin katı-sıvı ayrım verimliliğini desteklemektedir. Yapılan yarı kantitatif değerlendirmeye göre, elde edilen katı faz numunesinin yapısında yaklaşık %92,8 oranında metalik bakır (Cu) ve %7,2 oranında bakır oksit (Cu_2O) bulunduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçları, mekanik ayrıştırma işlemi sonrasında katı fazın büyük oranda metalik bakırdan oluştuğunu ve geliştirilen sistemin bakırın katı fazda yoğunlaştırılması açısından etkili bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, ayrıştırma sonrası geri kazanılan katı fazın yüksek bakır içeriğine sahip olduğunu ve ekonomik açıdan değerlendirilebilir bir ikincil hammadde niteliği taşıdığını göstermektedir.



Şekil 6. Katı faz numunesine ait x ışını difraktogram grafiği

Geri kazanılan nihai katı ürünün elementel bileşimi ve saflık yüzdesi WDXRF analizi ile kantitatif olarak belirlenmiş ve elde edilen kütlesel dağılım verileri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Geri kazanılan bakır tozunun WDXRF elementel analiz sonuçları

Bileşen	Ağırlıkça Yüzde (%)
Bakır (Cu)	99,6
Çinko (Zn)	0,012
Demir (Fe)	0,036

Tablo 1 verileri detaylıca incelendiğinde, tasarlanan hibrit sistem neticesinde kaba tel çekme çamurundan elde edilen ürünün ağırlıkça %99,6 oranında bakır içerdiği görülmektedir. Bu değer, ticari geri dönüşüm standartları ve ergitme tesislerinin hammadde kabul kriterleri (%99,0 Cu alt sınırı) dikkate alındığında mükemmel bir saflık seviyesidir.

Yapıda eser miktarda saptanan Demir (%0,036 Fe) ve Çinko (%0,012 Zn) elementlerinin, kaba tel çekme hattındaki yüksek hızlı mekanik operasyonlar esnasında metal matrislerin ve sirkülasyon pompalarının mikroskobik düzeyde aşınmasından kaynaklandığı sabittir. Proses çıktısında organik emülsiyondan gelebilecek karbon, kükürt veya klor türevlerinin tamamen yok edilmesi, kurgulanan kimyasal etkileşim basamağının metal yüzeyindeki organik emülsiyon filmini tam verimle kırdığını ve yüzeyi temizlediğini göstermektedir.

Geri kazanılan bakır tozlarının ultra eser element profilinin çıkartılması ve proses filtrat suyunda kalan metal iyonu kaçaklarının tespiti amacıyla yapılan ICP-MS analizlerinde, katı üründeki bakır doğruluğu teyit edilirken, yan bileşenler ppm seviyesinde belirlenmiştir. ICP-MS analizleri kapsamında, ayrıştırma işlemi sonrası elde edilen katı ve sıvı faz numunelerindeki bakır konsantrasyonları detaylı olarak belirlenmiş ve sistemin bakır geri kazanım performansı değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda katı faz içerisindeki bakır konsantrasyonu 990.800 mg/kg olarak ölçülürken, sıvı fazdaki bakır konsantrasyonu ise 362,6 mg/kg olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bakırın büyük oranda katı fazda yoğunlaştırıldığını ve mekanik ayrıştırma işleminin yüksek verimlilikte gerçekleştiğini göstermektedir. Katı fazda belirlenen yüksek bakır konsantrasyonu, geri kazanılan fraksiyonun ekonomik açıdan değerlendirilebilir bir ikincil hammadde niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte sıvı fazda düşük seviyede bakır bulunması, sistemin metal geçişini önemli ölçüde azalttığını ve sıvı fazın ileri arıtma veya yeniden kullanım potansiyeli açısından uygun bir karakter kazandığını göstermektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen hibrit geri kazanım sisteminin bakırın atık akımından etkin şekilde ayrıştırılmasında başarılı olduğunu desteklemektedir.

Sistemin filtrat fazından alınan numunelerin ICP-MS ölçümlerinde ise çözünmüş bakır iyonu derişiminin 4,2 mg/L seviyesine kadar düşürüldüğü saptanmıştır. Bu durum, uygulanan kimyasal flokülasyon ve pH kontrollü çökeltme adımlarının bakırı katı fazda maksimum oranda tuttuğunu, sıvı faza bakır kaçısını ve dolayısıyla atıksu yükünü minimize ettiğini göstermektedir. Mekanik işlemin yüksek kütlesel ayırma gücü ile kimyasal emülsiyon kırma reaksiyonlarının sinerjisi, geleneksel sadece membran içeren proseslerde karşılaşılan tıkanma, sık fouling temizliği ve düşük verim problemlerini elimine etmiştir. Geliştirilen hibrit sistem entegrasyonu sayesinde Seval Kablo tesislerinde açığa çıkan tehlikeli atık statüsündeki çamurlar, tesis içi veya entegre bir döngüsel yaklaşımla %98,5 hacimsel atık azaltımı ve %99,12 saflıkta hammadde eldesi ile başarıyla yönetilebilmektedir. Bu sonuçlar WDXRF verileriyle tam bir korelasyon göstermektedir.

Tablo 2. Katı faz ve sıvı faz için ICP-MS test sonucu

Numune Adı	**Sonuç (mg/kg)**
Katı Faz (Cu)	990800
Sıvı Faz (Cu)	362,6

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, kablo imalat sanayisinin en önemli atık yönetim problemlerinden biri olan kaba tel çekme bakır çamurlarının geri kazanımına yönelik mekanik işlem (dekantör) ve yüzey etkileşimli kimyasal flokülasyon yöntemlerini bir araya getiren hibrit bir sistem tasarlanmış, imal edilmiş ve performans karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen temel sonuçlara baktığımızda; geliştirilen ardışık mekanik ve kimyasal hibrit proses, bakır çamurunun yapısında bulunan kararlı su-yağ emülsiyon matrisini %98,5 oranında kırmayı ve metal yüzeyinden tamamen uzaklaştırmayı başarmıştır. XRD analizleri, geri kazanılan katı ürünün ana fazının yüzey merkezli kübik kristal yapıda yüksek kristaliniteye sahip elementel bakır (Cu) olduğunu göstermiştir. Tel çekme esnasındaki termal etkilere bağlı olarak yapıda az miktarda bakır (I) oksit (Cu_2O) sekonder fazının yer aldığı saptanmıştır. Yapılan XRF analizleri neticesinde, geri kazanılan tozların ağırlıkça %99,96 saflıkta bakır içerdiği, kablo endüstrisinde doğrudan hammadde ergitme süreçlerine beslenebilecek en üst kalite standardına ulaştığı doğrulanmıştır. ICP-MS analizleri, sıvı atık fazına bakır iyonu kaçışının son derece düşük seviyelerde (4,2 mg/L) tutulduğunu ve prosesin çevre dostu, yüksek seçicilikte bir ayırma verimine sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma kablo fabrikalarında tehlikeli atık olarak bertaraf edilen ve ciddi ekonomik kayıplara yol açan bakır çamurlarının, döngüsel ekonomi ilkelerine tam uyumlu, yeşil imalat konseptini destekleyen ve endüstriyel olarak ölçeklenebilir bir hibrit teknoloji ile katma değerli hammaddeye dönüştürülebileceğini somut bir şekilde ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalarda, sistemden ayrılan filtrat

su/emülsiyon fazının yeniden tel çekme hatlarında kullanılabilirliği üzerine optimizasyon süreçleri yürütülecektir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında kaba tel çekme prosesi atık çamurlarından yüksek saflıkta bakır geri kazanımı amacıyla tasarlanan ve optimize edilen mekanik ve kimyasal hibrit sistem hem akademik literatür hem de kablo imalat sanayisinin sürdürülebilirlik hedefleri açısından çok yönlü çıkarımları beraberinde getirmektedir.

Endüstriyel ölçeklenebilirlik ve atık minimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerde bertaraf havuzlarında biriken ve yüksek maliyetlerle fabrikadan uzaklaştırılan tehlikeli atık sınıfındaki bakır çamurları, kurgulanan ardışık dekantör santrifüj ve flokülasyon reaktörü sayesinde hacimsel olarak %98,5 oranında azaltılmıştır. Bu durum, kablo fabrikalarında atık yönetim süreçlerinin operasyonel yükünü hafifletirken, tehlikeli atık lojistiğinden kaynaklanan karbon ayak izini de radikal bir biçimde düşürmektedir. Katma değerli hammadde standardı hazırlanmıştır. Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM) ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi ÜSKİM Merkez Laboratuvarı tarafından tescillenen %99,96'lık bakır saflığı, proses çıktısının basit bir hurda veya ikincil sınıf metal olmadığını, doğrudan elektrolitik katot bakır kalitesinde bir hammadde olduğunu kanıtlamıştır. Bu yüksek saflık derecesi, geri kazanılan bakır tozlarının herhangi bir ön ergitme veya karmaşık tasfiye basamağına ihtiyaç duyulmaksızın, doğrudan Seval Kablo bünyesindeki anot/katot fırınlarına beslenebilmesinin önünü de açmaktadır. Yapıda kalan Fe (%0,036) ve Zn (%0,012) gibi ultra eser safsızlıkların döküm fazında cürufa transfer olabilecek eşik değerlerin çok altında kalması, döngüsel ekonomi modelinin tesis içi tam kapalı çevrim olarak kurgulanabileceğini göstermektedir.

Yeşil imalat ve ekonomik sürdürülebilirlik söz konusudur. Küresel bakır borsalarındaki (LME) fiyat dalgalanmaları ve birincil madencilik faaliyetlerinin yüksek çevresel maliyetleri göz önüne alındığında, üretim atığından elektrolitik saflıkta metal geri kazanılması, kablo endüstrisinde hammadde tedarik güvenliğini destekleyen stratejik bir argümandır. Geliştirilen hibrit yaklaşım, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve sınırda karbon düzenlemeleri mekanizmalarına uyum sağlamaya çalışan Türk kablo sektörüne ticari uygulanabilirliği yüksek, yeşil imalat prensiplerine tam uyumlu bir model sunmaktadır.

Araştırmanın bir sonraki aşamasında, sistem performansı sürdürülebilirlik ekseninde bir adım öteye taşınacaktır. Bu doğrultuda; kimyasal flokülasyon sonrasında sistemden ayrılan ve ICP-MS analizlerinde bakır iyonu yükünün 4,2 mg/L gibi deşarj limitlerinin altına indirildiği doğrulanan filtrat su/emülsiyon fazının, antibakteriyel ve termal stabilite optimizasyonları yapılarak kaba tel çekme hatlarında yeniden soğutma sıvısı olarak kullanılabilirliği incelenecektir. Böylelikle sistemde sıfır atık felsefesine ulaşılması hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Seval Kablo Araştırma ve Geliştirme Merkezi altyapısı ve laboratuvar imkanları ile Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Üniversite-Sanayi-Kamu İşbirliği Geliştirme, Uygulama ve Araştırma Merkezi (ÜSKİM) ve Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM) bünyesindeki analiz merkezlerinin ortak katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, desteklerinden ötürü ilgili kurumlara ve proje ekiplerine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

[1] Peters, R. W., ve diğ. (1984). "Evaluation of copper sulfide precipitation for the treatment of spent drawing lubricants," *Proceedings of the Industrial Waste Conference*, 38, 541-552.

[2] Brooks, C. S. (1984). "Metal recovery from industrial waste oxide and hydroxide sludges," *Studies in Environmental Science*, 23, 313-324.

[3] Gorzka, Z., ve diğ. (1992). "Decomposition of spent cooling oil emulsions from copper wire drawing processes," *Materials Chemistry and Physics*, 31(1-2), 115-122.

[4] Gorzka, Z., ve Kaźmierczak, M. (1994). "Electrochemical recovery of copper from spent drawing emulsions," *Environment Protection Engineering*, 20, 55-67.

[5] Lin, S. H., ve Lan, W. J. (1998). "Treatment of waste oil-water emulsion by ultrafiltration and an advanced oxidation process," *Chemical Engineering Journal*, 70(3), 259-263.

[6] Karakulski, K., ve diğ. (2000). "Purification of spent oil-water emulsions by combination of ultrafiltration and reverse osmosis," *Desalination*, 131(1-3), 87-95.

[7] Bodzek, M., ve diğ. (2006). "Treatment of waste oil-water emulsions by ultrafiltration and microfiltration," *Desalination*, 198(1-3), 31-40.

[8] Allende, N., ve diğ. (2020). "Sustainable recovery of oil and water from waste oil emulsions," *Journal of Environmental Management*, 260, 110-118.

[9] Wang, L., ve diğ. (2021). "Physicochemical treatment consisting of chemical coagulation, precipitation, sedimentation, and flotation for copper wire manufacturing wastewater," *Water Process Engineering*, 42, 102-115.

[10] Garcia-Costa, A., ve diğ. (2021). "Cutting oil-water emulsion wastewater treatment by microwave assisted catalytic wet peroxide oxidation," *Journal of Cleaner Production*, 312, 127-138.

[11] Ma, X., ve diğ. (2023). "Extraction of copper and nickel from wastewater using emulsion liquid membrane technique," *Separation and Purification Technology*, 308, 122-135.
[12] Dolaz, M., Kobya, M., ve Hung, Y. T. (2025). "Treatment of Metalworking Fluids and Wastewaters," *Industrial Waste Engineering Handbooks*, 4(1), 289-322.
[13] Antonicelli, M., Piccininni, A., ve Palumbo, G. (2025). "Eco-Friendly Lubricant for Cold Rolling Applications: Tribological Performance and Water Reuse from Disposed Emulsion," *Lubricants*, 13(2), 45-58.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

6000 Serisi Alüminyumlarda Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretimin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Senem Nur Cesur[a] , Serkan Apay[b]

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: senemnurcesur@gmail.com

ÖZET

Alüminyum ve alüminyum alaşımları mukavemetinin yüksek olması, ısı ve elektrik iletkenliği açısından iyi olması, çeliğe göre daha hafif olması, kolay işlenebilir ve şekillendirilebilir olması, dayanıklı olması gibi özelliklere sahip olması sebebiyle ulaşım, mimari, endüstriyel alanlar, havacılık, inşaat sektörü, elektrik ve elektronik sektöründe daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyumlar çelikten sonra en fazla kullanılan metallerdir. 6000 serisi alüminyum alaşımları, alüminyum-silisyum-magnezyum (Al-Si-Mg) alaşımları olarak da bilinir ve birçok alanda yaygın olarak kullanılır. 6000 serisi alüminyum alaşımları, orta ila yüksek mukavemetli yapısal bileşenlerin üretimi için iyi bir seçenek sunar. Bu alaşımlar, ekstrüzyon yöntemiyle de birçok şekil ve boyutlarda üretilebilirler. Ekstrüzyonda ise başlıca önemli değerler biyet hızı, biyet ve kalıp sıcaklıkları, basınç ve biyet alaşımıdır. Bu çalışmada 6000 serisine ait sert bir alüminyum alaşımından istenilen profili ekstrüzyon yöntemiyle elde edebilmek için tasarlanan kalıbın önce simülasyon programı ile çıkabilmesi tahmin edilen değerlerle sonucuna bakarak, olası istenmeyen sonuçlar karşısında da gereken parametrelerde değişiklik yapıp simülasyonda istenilen sonuç elde edildiğinde üretim aşamasına geçilecektir. Bu analiz sayesinde metal akışı, gerinim bölgeleri ve sıcaklık dağılımı belirlenerek kalıp tasarımı optimize edilir; yanılma olasılığımız minimuma inerek kalıp ve profil üretiminde malzeme, zaman ve hız gibi konularda tasarrufu sağlamış oluruz.

Anahtar Kelimeler: *AA6000 serisi alüminyum, Ekstrüzyon, Sonlu elemanlar analizi, Tasarım.*

Finite Element Method Analysis of Extrusion Production of 6000 Series Aluminum Alloys

Senem Nur Cesur[a] , Serkan Apay[b]

[a]Düzce University, Institute of Graduate Studies, Department of Mechanical Engineering, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** senemnurcesur@gmail.com

ABSTRACT

Aluminum and aluminum alloys have come to be used more widely in transportation, architecture, industrial applications, aerospace, the construction sector, and the electrical and electronics industries due to their high strength, good thermal and electrical conductivity, lighter weight compared to steel, ease of machining and forming, and durability. Aluminum is the second most widely used metal after steel. 6000 series aluminum alloys, also known as aluminum-silicon-magnesium (Al-Si-Mg) alloys, are widely used in many fields. 6000 series aluminum alloys offer a good option for the production of medium to high-strength structural components. These alloys can also be produced in various shapes and sizes using the extrusion method. In extrusion, the primary critical parameters are die speed, die and die-holder temperatures, pressure, and die alloy. In this study, to produce the desired profile from a hard aluminum alloy of the 6000 series using the extrusion method, the die designed for this purpose will first be simulated using a simulation program. Based on the results obtained from the estimated values, adjustments will be made to the necessary parameters in response to any potential undesirable outcomes, and production will proceed once the desired results are achieved in the simulation. Through this analysis, metal flow, strain zones, and

temperature distribution are determined to optimize the die design; by minimizing the likelihood of errors, material, time, and speed are optimized in die and profile production.

Keywords: *AA6000 series aluminum, Extrusion, Finite Element Analysis, Design.*

I. GİRİŞ

Alüminyum metali; periyodik cetvelde simgesi Al ve atom numarası 13 olan, mat gümüşi rengi olan, sünek ve hafif bir maddedir. Alüminyum manyetik değildir. Zehirli değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık olarak 49 Megapascal (MPa)'dır. Fakat alaşım elementleri yapıya katıldığında bu değer 700 MPa'a kadar çıkar. Yoğunluğu 25°C sıcaklıkta 2.70 g/cm^3 olup, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Kolay dövülür, talaşlı imalat yöntemleriyle kolaylıkla şekil verilebilir ve dökülebilir. Üzerinde oluşan oksit tabakası sayesinde korozyon özelliği yüksektir [1]. Erime sıcaklığı 660 °C, kaynama sıcaklığı ise 2519 °C'dir. [2] Alüminyum çevre dostu bir malzeme olarak da ön plana çıkmaktadır. Alüminyum metali teorik olarak %99,9 geri dönüştürülebilir olması sayesinde çevre kirliliğinin azaltılması açısından da ön plana çıkmaktadır.

Alüminyum metali; ülkemizde de mühendislik malzemesi olarak demir ve çelikten sonra en fazla üretilen ve kullanımı tercih edilen bir metaldir. Alüminyum sektörü, hızla büyümekte olan bir sektör olup dünyanın birçok noktasına ihraç edilmektedir [3]. Alüminyum inşaat sektörü ağırlıklı olmak üzere, özellikle cephe ve çatı kaplama, pencere ve kapı sistemlerinde, iskele, merdiven ve sera yapımlarında ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra taşımacılık sektöründe, vagon imalatında, uçak, ambalaj sanayii, güneş enerji sistemlerinde, aydınlatma sistemlerinde soğutucu olarak, elektrik, kablo üretimi, makine elemanları, robotik sistemlerde, metalurji alanında, makine imalatında, otomotiv sanayii ve özellikle günümüzde üretimi ve kullanımı giderek artmakta olan elektrikli arabalarda tercih edilmektedir [4]. Alüminyumun bazı özel alaşımları ise hafiflik ve dayanıklılık özellikleri sayesinde savunma sanayinde de ön plana çıkmaya başlamıştır [5]. Bazı alüminyum alaşımlarının mukavemet değerinin çelikten daha fazla olması nedeniyle ekstrüzyonla şekil vermede de ilk sıralarda tercih edilmektedir [6].

Ektsrüzyon yöntemi ilk ortaya çıktığında insan gücü ile kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyumun ekstrüzyonla üretimi ise günümüzden 100 yılı aşkın bir geçmişe dayanmaktadır [7]. Alüminyumun ekstrüzyonla şekillendirilmesi işlemi; alüminyum biyetinin yüksek sıcaklıklara (470-480°C) ısıtılarak yine ısıtılmış bir kalıp içerisinden yüksek basınçlardan faydalanılarak geçirildiği üretim sürecinin tamamıdır. Alüminyum bu üretim sürecinde profili ortaya çıkaracak olan özel tasarlanmış kalıptan geçerken oluşan sürtünmeler ve kalıp sıcaklığı sayesinde 510-520°C sıcaklık değerlerine çıkarak üretimi gerçekleştirilir. Şekillendirilmiş olan alüminyum biyet artık profil ismini almaktadır. Profil çıkışı istenilen çıkış sıcaklıklarına ulaştıktan sonra profilin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla termik işlemler uygulanır. Bu termik işlemler soğutma, ısıtma ve yaşlandırma olarak sayılabilir [6]. Bu işlemler sayesinde profil istenilen sertlik düzeyine, dayanıma, gerinime ulaşır ve bu sonuçlar doğrultusunda da profilin net ölçülerinin kontrolü sağlanır. Ancak tüm bu alüminyum ekstrüzyon işlemi sürecinde oluşabilecek potansiyel sorunlar mevcuttur. Bu sorunlar başlıca; profilin bazı kısımlarının istenilen ölçülerde çıkmaması, kalıpların kırılabilmesi, istenilen sertlik düzeyine ulaşılamaması, profilin bazı kısımlarında kaynaşma problemlerinin oluşması olarak sıralanabilir. Tüm bu sorunları gidermek için yapılan çalışmalar ve alınan önlemler de bu alüminyumun ekstrüzyonla üretim sürecinin önemli bir parçasıdır.

Alüminyum ekstrüzyonu bütün bir üretim süreci olarak hammaddenin dökümünün yapıldığı andan başlayarak ekstrüzyon hattından çıkan profilin paketlenip son kullanıcıya sevkiyatına kadar olan tüm süreci kapsayan geniş bir sistem olarak düşünülse bile kalıp ekstrüzyon yöntemiyle üretim, üretimin kalbidir. Bu noktada da kalıp tasarımı çok büyük bir öneme sahiptir. Kalıp tasarımı malzemenin akışını yönlendiren en önemli unsurdur. Dolasıyla profilin geometrik ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli aşamadır. Kalıp tasarımı yapılırken tasarımı yapan kişiye bağlı olarak aynı profil için farklı düşünceler ve tasarım biçimleri görülmektedir. Kalıp tasarımının doğru bir şekilde gerçekleştirilmiş olması, ürünün kalitesini, ölçülerinin doğru çıkabilmesini, dayanıklılığını, kalıp ömrünü doğrudan etkileyen önemli bir adımdır. Üretim verimliliğini artırır ve üretim maliyetini düşürür. Kısaca kalıp tasarımı profillerin iyileştirilmesindeki kilit noktadır.

Bu çalışma, üretimde oluşabilecek sorunları konu edinerek kalıp tasarımı sürecinde uygulanabilecek tasarım kriterlerini ve tasarım aşamasında oluşan hataları daha net bir şekilde belirleyerek önlemler alıp önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmayla literatüre ve alüminyum ekstrüzyon sektörüne önemli katkılar sağlanması hedeflenmekte olup, hammadde kayıplarını azaltıp verimliliği artırarak sektöre pratik bir çözüm yolu sunulması planlanmaktadır. Ülkemizde ciddi bir üretim hacmine sahip alüminyum ekstrüzyon süreçlerinde hammadde olarak alınmış olan ürünün büyük bir kısmının hurdaya ayrılması; ciddi maliyet artışına, zaman ve enerji kayıplarına neden olduğu görülmektedir. Bu çalışma, sektörde yaşanan bu

önemli sorunlara yönelik çözüm arayışını temsil etmekte ve uzun ömürlü kalıplar tasarlayarak bunların kullanılmasını teşvik ederek daha yüksek ürün verimliliği, daha az maliyet, daha az hammadde israfı ile daha az zaman ve enerji kayıplarına ulaşmak konusunda sektöre katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

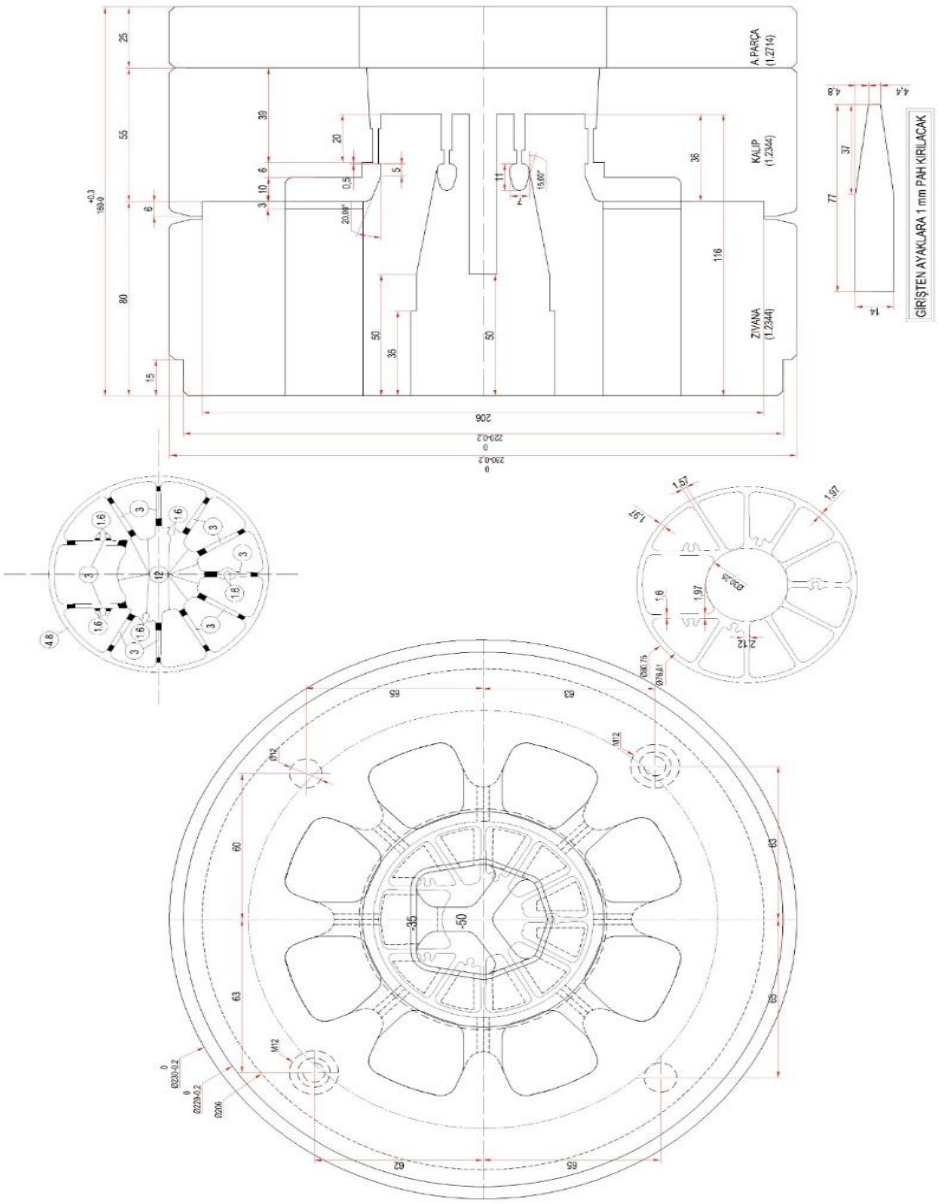
Ekstrüzyon yönteminde en kritik nokta malzeme akışını doğru yönlendirmektir. Kalıp içerisindeki metal akışı nihai ürünün mekanik özelliklerini ve iç yapısını doğrudan etkilemektedir. Kalıp içerisinden geçen metal akışını tahmin edebilmek için bir çok araştırmacı tarafından farklı çalışmalar yapılmıştır. Kim ve ekibi,[8] 1XXX serisinden iki farklı alüminyum alaşımı kullanarak zıvanalı kalıplardaki malzeme akış karakteristiğini analiz etmişlerdir. Koopman doktora tezinde[9] sonlu elemanlar yönteminden yararlanarak ve belirli koşullar altında kalıp tasarımı için sistematik bir yaklaşım geliştirmeyi hedeflemiştir ve bu doğrultuda alüminyum metaliyle odacıklı kalıpların tercih edildiği bir ekstrüzyon uygulamasıyla geliştirdiği yöntemi somutlaştırmıştır. Liu ve ekibi[10] malzemedeki kaynaşma problemini kalıp tasarımında değişiklik yaparak iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Gagliardi ve ekibi [11] tarafından yürütülen çalışmada, odacıklı kalıplarda kaynaşma kalitesini iyileştiemek ve bölgedeki malzeme akış biçimini doğru tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemi temel alan bir yaklaşım benimsenmiştir. Llorca-Schenk ve ekibi [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 4 odacıklı ve 4 figürlü zıvanalı kalıpların tasarımı matematiksel olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarım süreci hızlandırılmış; kaynaşma odası ve ayak boyu hesaplamalarıyla malzeme akışının en verimli seviyeye getirilmesi hedeflenmiştir. 6082 gibi sert alaşımlarda kaynak kalitesini artırmak için iki alternatif kalıp tasarımı geliştiren Karakaya [6], imal edilen kalıplardan alınan ürünleri çekme ve sertlik testlerine tabi tutmuştur. Çalışma kapsamında, analiz çıktıları ile gerçek üretim verileri karşılaştırılarak tasarımların nihai ürün üzerindeki etkinliği saptanmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, AA6063 tip alüminyum alaşımından istenilen ölçülerde sağlıklı profil üretimi için ilk olarak bilgisayar destekli çizim programıyla kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu tasarım sonlu elemanlar tabanlı HyperXtrude yazılımı yardımıyla prosesin modellemesi yapılarak elde edilmesi beklenen profilin sıcaklık dağılımları, akış hız değerleri ve gerinim değerleri analiz edilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre tasarım aşamasına geri dönülerek tasarımdaki malzeme akışında iyileştirmeler yapılmıştır. Ve analizlerin sonucunda ortaya çıkan hız değerleri, gerinim değerleri ve çıkış sıcaklıkları beklenen şekilde olduğunda profildeki homojen malzeme akışına ulaşıldığı ön görülmüştür. Bu beklenen sonuç ile kalıp tasarım süreci tamamlanarak ekstrüzyon süreci başlatılmıştır.

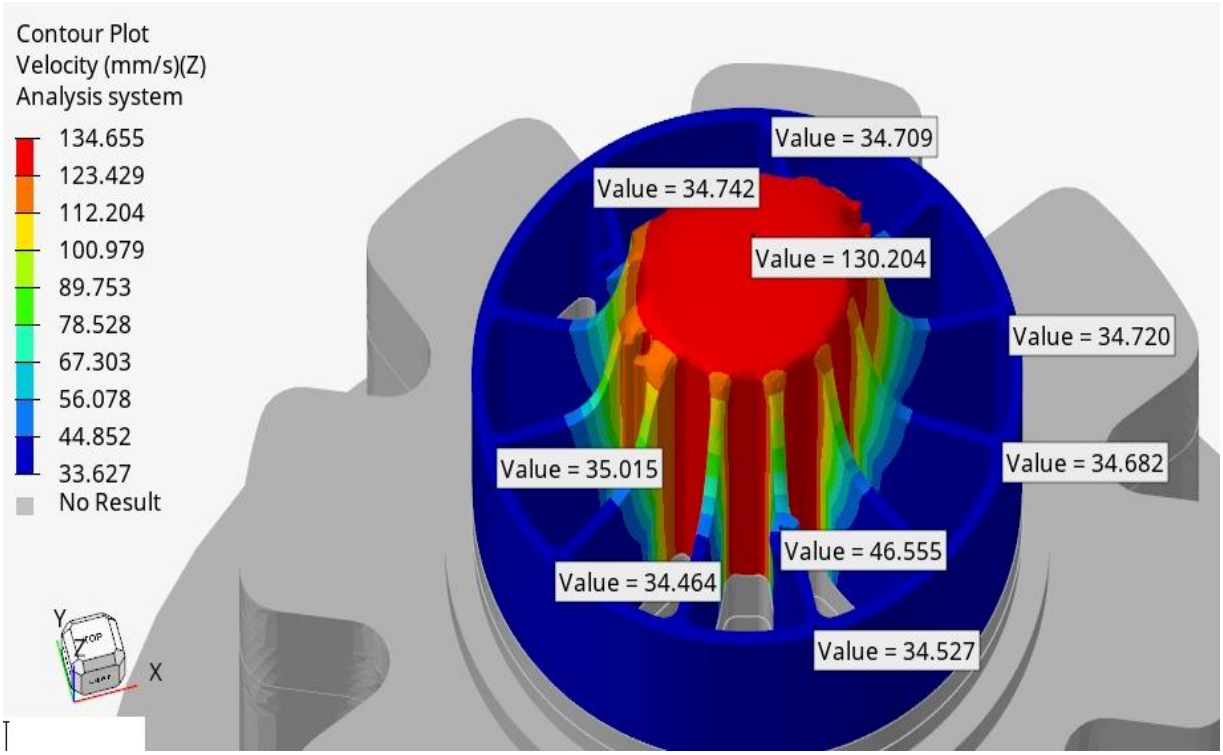
AA6063 tip alüminyum alaşımı kullanılarak üretilecek olan bu profildeki en kritik sorun; profilin iç ve dış et kalınlıklarının arasındaki yüksek farkın da etkisiyle dolu bölgenin çok hızlı gitmesi halinde zıvananın kırılma ihtimali ya da meydana gelebilecek olan kaynaşma sorunudur.

Analizi yapılan ilk tasarıma ait kalıp dizaynı Şekil 1’ de gösterilmiştir.

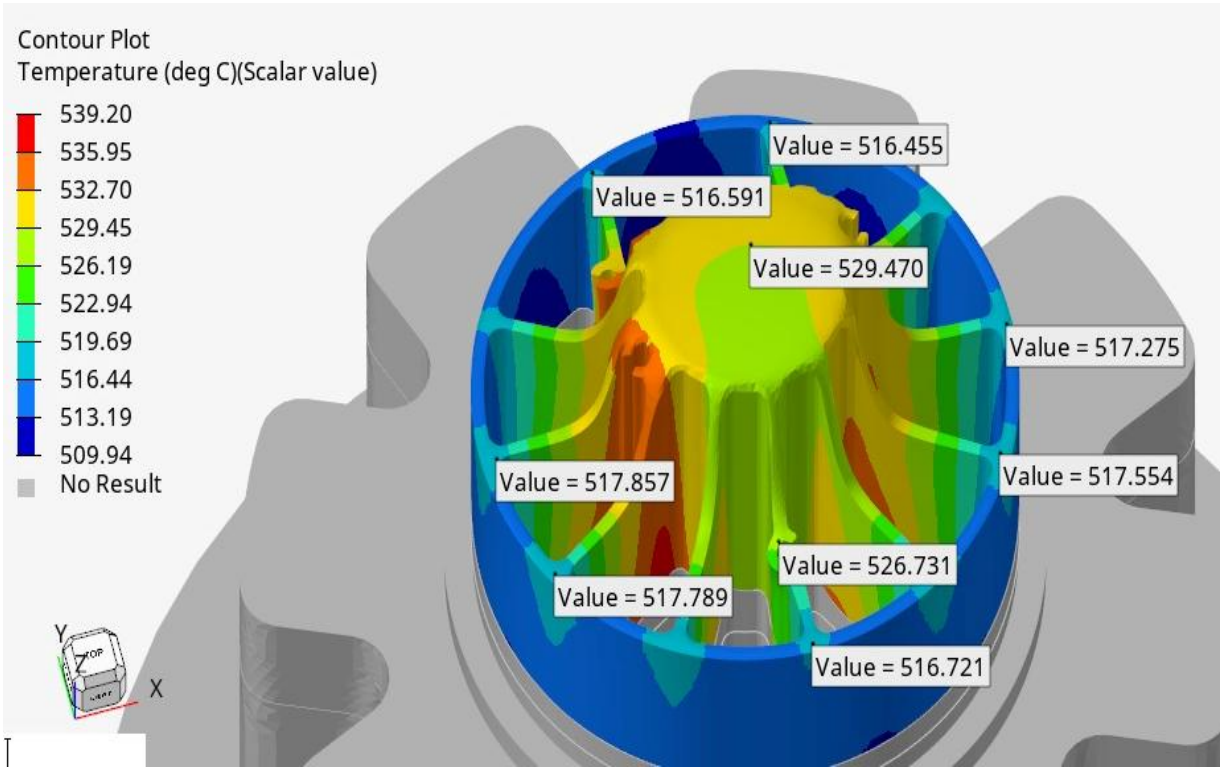


Şekil 1. İlk tasarım.

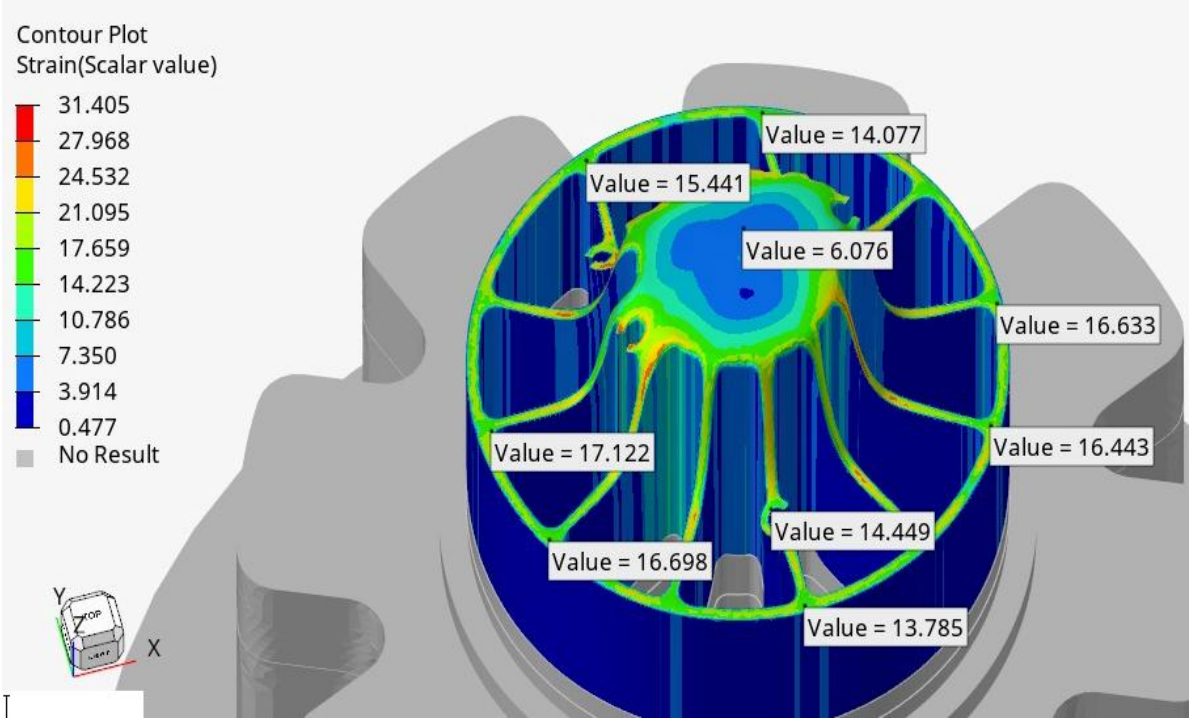
Yapılan ilk tasarıma ait akış hız değerleri, sıcaklık dağılımları ve gerinim değerlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4' te gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıbın ilk tasarımına ait analiz sonucuna göre akış hızları dağılımı.



Şekil 3. Kalıbın ilk tasarımına ait analiz sonucuna göre sıcaklık değerleri.

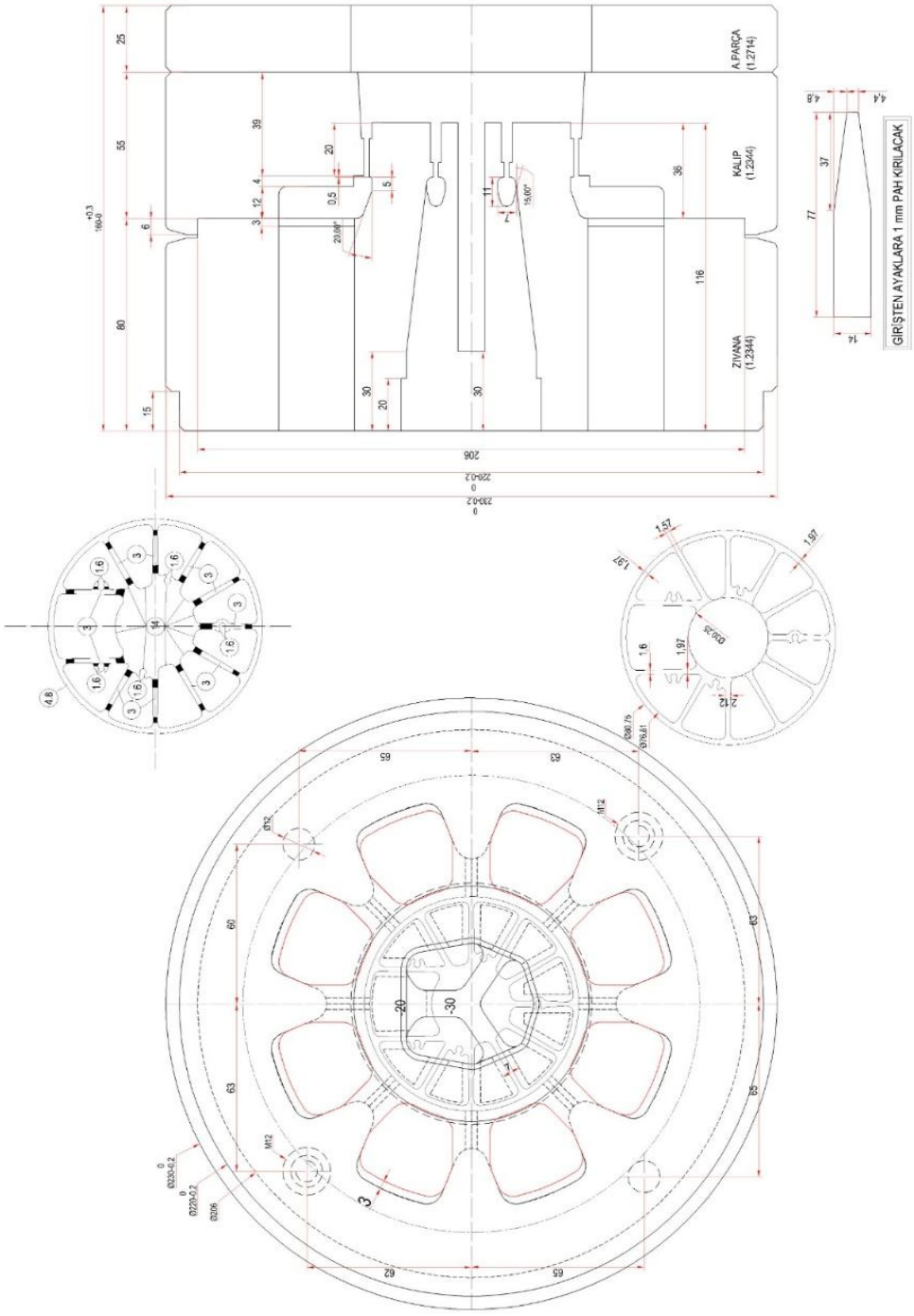


Şekil 4. Kalıbın ilk tasarımına ait analiz sonucuna göre gerinim değerleri.

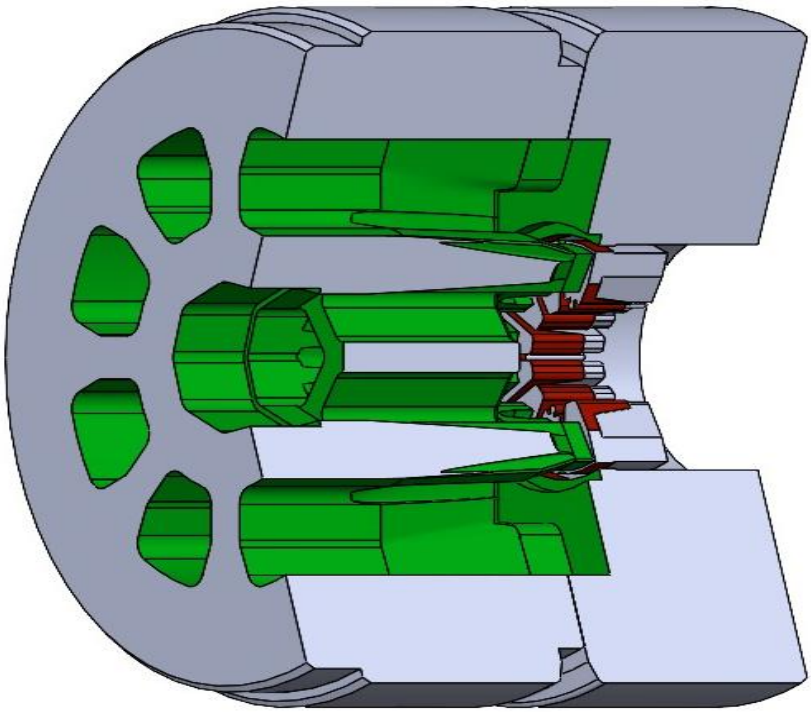
Malzeme akışı profilin iç kısmındaki dolu bölgede hızlı bir şekilde gerçekleşeceğinden profilin merkezden dışa doğru olan kısımlarında et kalınlığının da incelmesiyle malzeme akışı daha yavaş gerçekleşecektir. Bu da profilin malzeme yapısının düzensiz olmasına yol açmaktadır. Yapılan analiz sonuçları da bu doğrultuda olmuştur.

III. SONUÇLAR

İlk tasarıma ait analiz sonuçlarından sonra profildeki malzeme akşını daha dengeli hale getirebilmek için homojen bir malzeme akşına yaklaşana dek tasarımda farklı değişiklikler yapılarak bir kaç kez daha simülasyon yapılmıştır. Analizi yapılan ve üzerinde revizeler yapılmış olan kalıp dizaynı Şekil 7'de gösterilmiştir. Son kalıp dizaynının üç boyutlu tasarımı da Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Son tasarım

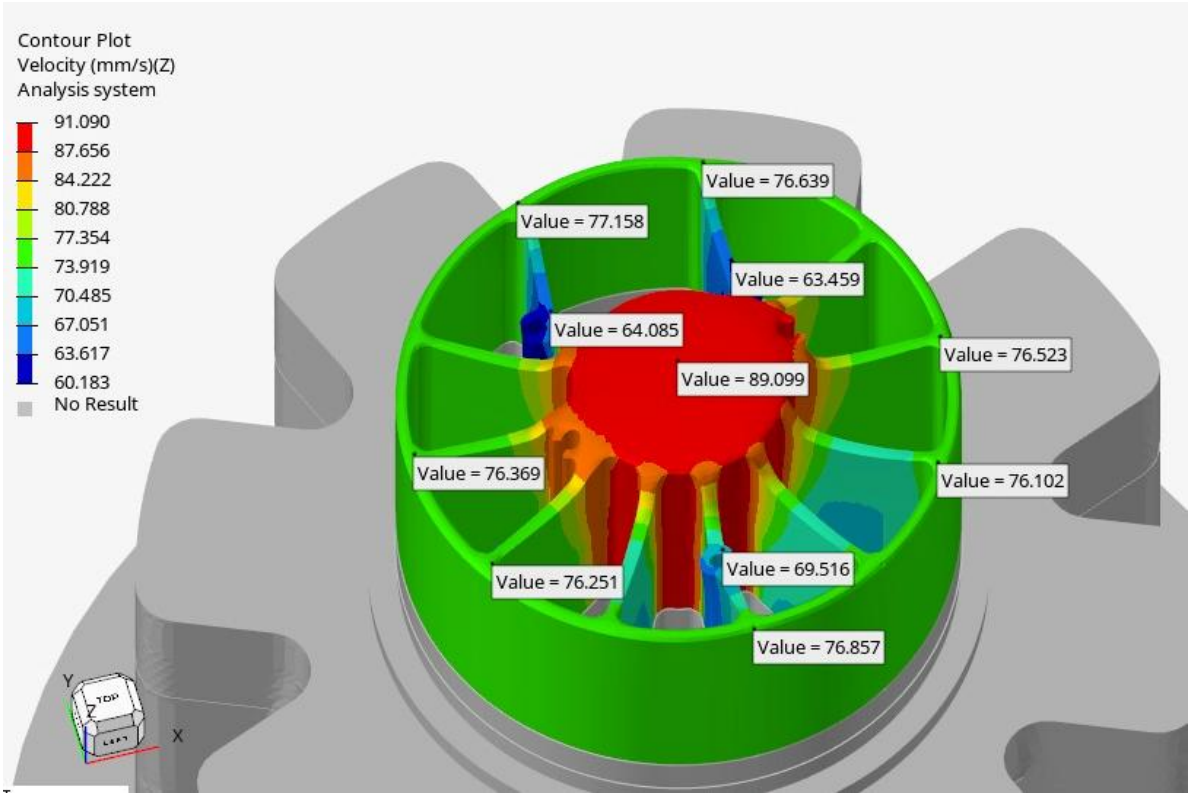


Şekil 8. Son tasarımın üç boyutlu tasarımı.

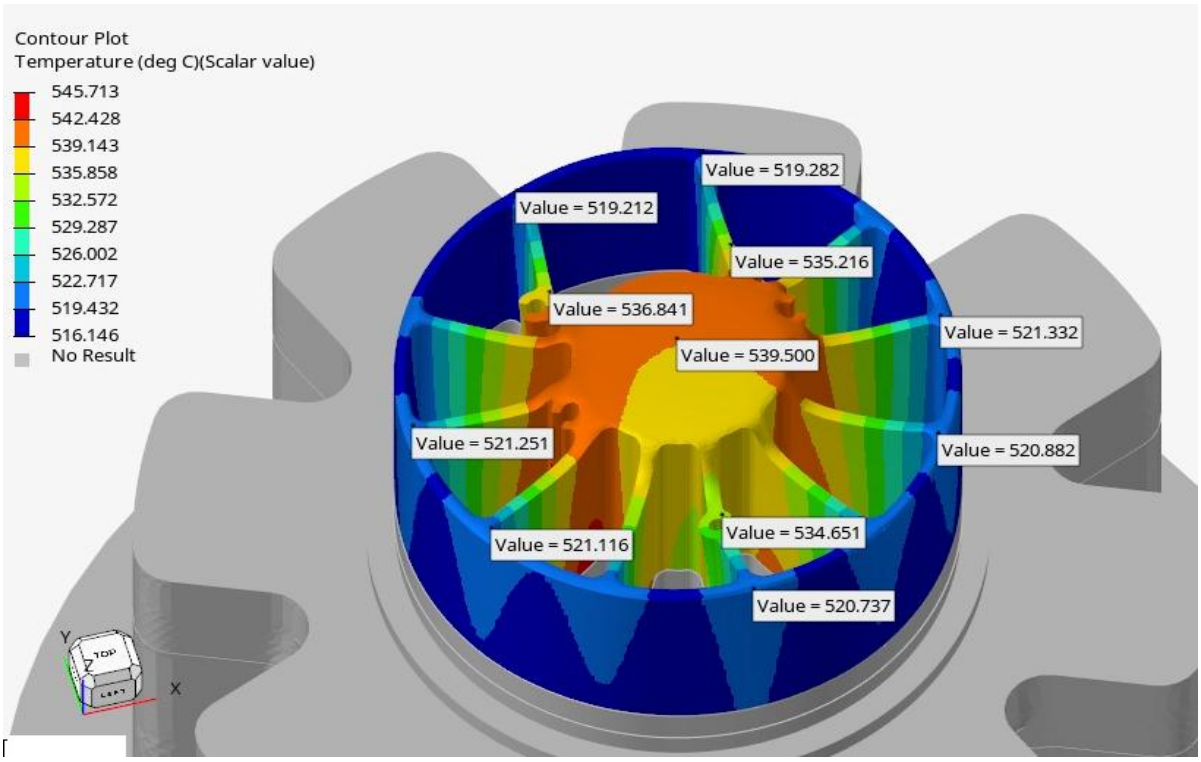
Şekilde gösterilen yeşil renkli kısımlar malzemenin akış sırasında temas ettiği bölgeler, kırmızı renkli kısımlar ise geçiş sürtünme bölgeleridir.

İlk tasarımın analiz sonuçlarına göre profilin merkezdeki dolu kısmında malzeme akışının profilin çevre kısımlarına göre fazla hızlı olmasından kaynaklı dolu kısımdaki geçiş sürtünme uzunlukları artırılarak ve orta gözlerin derinlikleri düşürelerek ortadaki malzeme akışı çevre duvarlara yönlendirilmiş aynı zamanda çevre gözler dış kısımlardan 3'er mm büyütülerek alanları 905 mm^2'den 1007 mm^2'ye artırılmıştır.

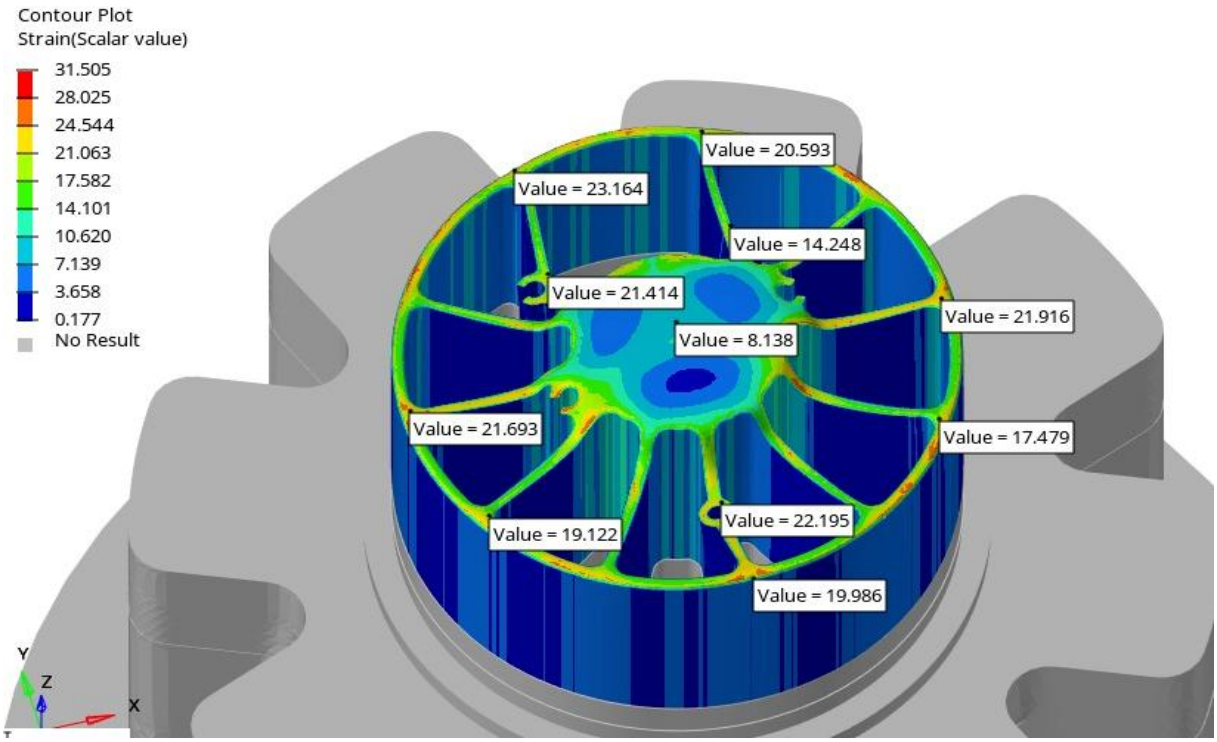
Tasarımda yapılan bu iyileştirme adımlarıyla analiz sonucu profilin et kalınlıkları farkının yüksek olmasına rağmen malzeme bütünlüğünün sağlanarak üretim aşamasında istenen aralıktaki sonuçlardır. Profildeki akış hız değerlerinin, gerinim değerlerinin ve sıcaklık değerlerinin en yakın olduğu ve tasarım sürecini sonlandıran son analizden elde edilen akış hızı değerleri, sıcaklık dağılımları ve gerinim değerleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Kalıbın son tasarımına ait analiz sonucuna göre akış hızları dağılımı



Şekil 9. Kalıbın son tasarımına ait analiz sonucuna göre sıcaklık değerleri



Şekil 10. Kalıbın son tasarımına ait analiz sonucuna göre gerinim değerleri

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, sonlu elemanlar tabanlı HyperXtrude yazılımı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları sayesinde iş birliği yapılan firmada kalıp tasarımında adım adım iyileştirmeler ve tekrar analizler yapılarak ortaya çıkacak olan AA6063 tip alüminyum alaşımından oluşan profilin; istenilen ölçülerde ve homojen malzeme akışına sahip bir yapıyla ekstrüzyondan çıkışı sağlandı. Sonlu elemanlar tabanlı HyperXtrude yazılımı tasarım sürecinde kullanılmamış olsaydı yüksek bir ihtimalle zıvana kırılacaktı. Kırılmaması halinde ise elde edilecek olan profil bozuk ölçülerde ve kaynaşma problemleri oluşarak çıkmış olacaktı. Yapılan simülasyon sonuçlarına dayanarak en ideal sonuç yakalandı. Bu ideal sonuç doğrultusunda tasarım süreci tamamlandı ve ekstrüzyon sürecine geçildi. İş birliği yapılan firmada ekstrüzyon denemesinde ilk testte profil istenilen ölçü ve malzeme akış dağılımında çıkarak onaylandı. Ekstrüzyon sonucu ilk deneme çıkışı Şekil 11' de ve numune profil Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Pres çıkışındaki profil



Şekil 12. Numune profil

V. ÇIKARIM

Kalıp ektsrüzyonu ile elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kalıbın ekstrüzyon presinden yüksek kalitede ve kaynaşma sorunu olmadan ürün elde edilmiştir. Sonlu elemanlar tabanlı HyperXtrude yazılımı ile yapılan analizler dikkate alınarak yapılmış olunan tasarım değişikliklerinin üretim sonuçlarıyla maksimum seviyede örtüştüğü gözlemlenmiştir. Tasarım sürecinde sonlu elemanlar tabanlı Inspire Extrude Metal (eski adıyla HyperXtrude) yazılımı kullanılarak tasarım sürecinin tamamlanması sayesinde alüminyum ekstrüzyon sürecinde çıkabilecek sorunlara karşı bir önlem alınabilmekte ve ekstrüzyon sürecine zaman, enerji, hammade ve maddi tasarruflar sağlamaktadır. Elde edilen başarılı profiller sayesinde sektördeki kaliteli üretim de artış göstermektedir.

KAYNAKLAR

[1] B. Yılmaz, "Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2002.

[2] Y. Sun, "Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1998.

[3] İstanbul Demir ve Demir Dışı Metaller İhracatçıları Birliği, "Çalışma Raporu," İstanbul, 2011.

[4] "Alüminyum Ekstrüzyon Profil," Formal Alüminyum, 2019. [Online]. Available:http://www.formal.com.tr/aluminyum/21/4/21/aluminyum_ekstruzyon_profil.html [Accessed: Nov. 10, 2018]

[5] O. Metin, "Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Silisyumun Malzeme Mukavemetine Etkisi," Bitirme Ödevi, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1973.

[6] İ. Karakaya, "Alüminyum ekstrüzyonunda kaynaşma kalitesi ve iç uzama probleminin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, 2023.

[7] F. Güngördü, "Alüminyum Ekstrüzyon Kalıp Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, 2019.

[8] Y. T. Kim, K. Ikeda, and T. Murakami, "Metal flow in porthole die extrusion of aluminium," Journal of Materials Processing Technology, vol. 121, no. 1, pp. 107–115, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(01)01215-8.

[9] A. J. Koopman, "Analysis tools for the design of aluminium extrusion dies," Ph.D. dissertation, University of Twente, The Netherlands, 2008.

[10] Z. Liu, L. Li, S. Li, J. Yi, and G. Wang, "Simulation analysis of porthole die extrusion process and die structure modifications for an aluminum profile with high length-width ratio and small cavity," Materials, vol. 11, no. 9, Art. no. 1517, 2018, doi: 10.3390/ma11091517.

[11] F. Gagliardi, G. Ambrogio, and L. Filice, "On the die design in AA6082 porthole extrusion," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 61, no. 1, pp. 231–234, 2012, doi: 10.1016/j.cirp.2012.03.122.

[12] J. Llorca-Schenk, I. Sentana-Gadea, and M. Sanchez-Lozano, "Design of porthole aluminium extrusion dies through mathematical formulation," Materials Today Communications, vol. 27, Art. no. 102301, 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102301.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Yorumlanabilirlik ve Etik Perspektifiyle Görüntü İşleme Modellerinin Şeffaflığı: Kuramsal Bir Analiz

Beyza Özata[a], Nurdanur Pehlivan[a]*

[a]Doğuş Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** bozata@dogus.edu.tr

ÖZET

Evrişimli Sinir Ağları (CNN) ve Görüntü Transformatörleri (ViT) gibi derin öğrenme temelli modellerin görsel tanıma görevlerindeki performansı, bu sistemlerin karar alma süreçlerinin anlaşılabilirliği konusunda tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Bu durum, literatürde sıklıkla 'kara kutu problemi' olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada görüntü işleme modellerinin karar mekanizmalarının kararlarının yorumlanabilir hale getirilmesine yönelik yaklaşımlar incelenmiş; özellikle LIME ve SHAP gibi yerel açıklanabilirlik yöntemlerinin matematiksel dayanakları ele alınmıştır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin sunduğu açıklamaların ne ölçüde güvenilir ve tutarlı olduğu, algoritmik adalet ve şeffaflık kavramları çerçevesinde tartışılmıştır. Yapılan değerlendirmeler, açıklanabilirlik yöntemlerinin yalnızca teknik bir çözüm sunmakla kalmadığını, aynı zamanda kullanıcı güveni ve etik denetlenebilirlik açısından da belirleyici bir rol oynayabildiğini göstermektedir. Ancak, bu yöntemlerin farklı durumlarda değişken sonuçlar üretebilmesi ve yorumların her zaman doğrudan karar mekanizmasını yansıtmayabilecek olması dikkatle ele alınması gereken sınırlılıklar olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, açıklanabilirlik yaklaşımlarının daha sistematik biçimde ele alınmasının ve etik ilkelerle birlikte değerlendirilmesinin, güvenilir yapay zeka sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği savunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Açıklanabilir yapay zeka (XAI), Algoritmik adalet, Görüntü işleme, Model şeffaflığı, Yapay zeka etiği.*

Transparency of Image Processing Models from an Interpretability and Ethical Perspective: A Theoretical Analysis

Beyza Özata[a], Nurdanur Pehlivan[a]*

[a]Doğuş University, Faculty of Engineering, Department of Sofware Engineering, İstanbul/Türkiye.
[*] **Corresponding Author:** bozata@dogus.edu.tr

ABSTRACT

The performance of deep learning-based models, such as Convolutional Neural Networks (CNNs) and Vision Transformers (ViTs), in visual recognition tasks has sparked discussions regarding the interpretability of their decision-making processes. This issue is frequently referred to in the literature as the 'black-box problem'. This study examines approaches aimed at making decision mechanisms of image processing models interpretable, with a particular focus on the mathematical foundations of local explainability methods such as LIME and SHAP. Furthermore, the reliability and consistency of the explanations provided by these methods are discussed within the framework of algorithmic fairness and transparency. These evaluations indicate that explainability methods offer more than just a technical solution; they also play a decisive role in establishing user trust and ensuring ethical accountability. However, the fact that these methods can produce variable results in different scenarios and that the explanations may not always directly reflect the decision-making mechanism stand out as limitations that require careful consideration. In this context, it is argued that more systematic approach to explainability methods and its evaluation in conjunction with ethical principles could contribute to the development of reliable artificial intelligence systems.

Keywords: *Image processing, Explainable artificial intelligence (XAI), Model transparency, Algorithmic fairness, AI ethics.*

I. INTRODUCTİON

In recent years, computer vision and deep learning models, including CNNs and ViTs, have gained importance as decision-making tools for numerous areas that require highly safety-relevant standards from self-driving cars to medical diagnostics tools ([1], [2]). Especially in the case of medical imaging tasks, such as pathology diagnosis and identification of tuberculosis through chest radiographs (CXR), models have demonstrated high accuracy rates equal to those of humans ([3], [4]). At the same time, with the increasing number of layers and parameters used in the architecture of models, it is becoming increasingly challenging to trace how inputs are converted into outputs, leading to the problem described in literature as "epistemic opacity" or "the black box" phenomenon [5]. This issue raises numerous problems, as the opacity of the decision-making process in medical technologies that affect human life does not only make it hard to find the causes of mistakes made by the system but poses an ethical dilemma by contradicting with laws and norms, such as the "right to explanation" law [6].

In order to solve the opacity problem and build trust in the medical community, many articles refer to the use of post-hoc model-independent explainable artificial intelligence (XAI) methods like LIME and SHAP [7]. Unlike the use of LIME that transforms the complex model to a simplified linear model in a certain decision point, SHAP uses the marginal impact of each pixel on the decision-making process through cooperative game theory. Nevertheless, recently there are concerns regarding the consistency and robustness of the mentioned explanations against input perturbations [8]. The LIME and SHAP algorithms perform independent masking of single pixels in the input data in order to observe how the model behaves. Nonetheless, in the case of high-dimensional images from biomedicine where all the anatomical structures are interdependent; assigning zeros to random pixels or using their average values generates imaginary data points [9]. From a theoretical perspective, ignoring the interaction patterns of data points is a critical problem that prevents the model from explaining its decisions based on relevant features ([10], [11]).

In the case of human-computer interaction, instability leads to dangerous cognitive biases, creating opportunities for manipulation in the area of medical psychology. Simply by presenting an explanation with visual transparency, it is possible to make healthcare professionals believe that the model performs without any error. This situation is known as automation bias [12]. In fact, scientific studies have demonstrated that experienced doctors utilize XAI to confirm the existing assumptions about the diagnosis made by the expert (confirmation bias) [13]. If there are convincing but inconsistent explanations that are provided along with erroneous outputs of a sophisticated model, the "boomerang effect" occurs; causing people to stick with their wrong conclusions [14]. Unconditional trust on explanations offered by the model leads to gradual suppression of the ability to reason about actions and makes clinicians vulnerable to "*learning myopia*" ([13], [15]).

There is another significant social and ethical issue relating to transparency tools that transcends technical visualization. Deep learning models tend to reproduce discriminatory decisions that threaten digital equity by internalizing historical, socio-demographic, and structural biases in training sets [16]. However, the common practice of *"fairness through blindness,"* whereby sensitive information (e.g., race and gender) is excluded from the data set, has been unsuccessful within complex data sets; since those features remain implicit due to other geographic or clinical correlations [6]. It shows that demographic bias and algorithmic opacity pose the biggest challenges in healthcare analytics [16]. Consequently, XAI techniques should stop being passive tools for interpreting predictions and be redesigned in order to reveal biases in representation and discrimination. "Fairness through blindness," the conventional method of ensuring fairness in deep learning by excluding sensitive attributes (race and gender) from the dataset, has proven ineffective when such features are embedded implicitly within geographical data samples or relationships in clinical practice [6]. The conclusion, therefore, is that demographic bias and opacity are the most significant barriers to health data analytics [16]. For this reason, it is essential to transform XAI tools from technical devices for explaining single predictions to tools of revealing biases.

This study is focused on exploring the decision-making process of deep neural networks such as CNNs and ViTs in critical clinical decision support systems through a multidimensional theoretical perspective. This research seeks to conduct a holistic analysis not only on the basis of computability of popular XAI methods like LIME and SHAP; but also on the clinical-anatomical relevance of the explanations provided by those techniques, the impact of those explanations on clinical psychology, and their algorithmic bias considerations.

The primary contribution of this study is that it shows, from a theoretical perspective, that opening the black box may not be enough alone to guarantee reliability in AI integration for clinical settings. By focusing

on the security problems generated through perturbation techniques on highly correlated datasets, this study reflects upon the most widespread approaches to XAI and stresses the need for *zone-based* explanations techniques that are more applicable in the context of clinical anatomy [9]. In such a light, in order to build safe decision-making systems, we must adopt not just technical improvements but socio-technical and universal safety precautions as well. Overall, this review seeks to establish the basis for designing human-centered AI technology in which doctors play not the role of *output validators* but *human-in-the*-loop evaluators of algorithms.

II. Method

This research can be described as theoretical research and literature analysis to assess the threats associated with the black box problem for the image processing models and current XAI methods. It uses a qualitative and analytical method; based on an extensive literature review to analyze the shortcomings in existing XAI models in regard to transparency, safety, and fairness. Considering the complicated nature of the problem at hand, it is important to comprehend both the technical reasoning behind deep learning decisions as well as their social significance. Therefore, rather than developing an alternative model, this research focuses on the critical analysis of existing XAI methods.

Understanding the reasons behind the error in decision-making by the machine learning algorithms is the purely technical aspect of solving the task. However, providing explanation of these decisions and their justification is an additional legal and ethical responsibility that stems from the need to protect people's rights. To tackle this complex problem and analyze various aspects of explainable artificial intelligence models, such approach was selected.

The principles behind LIME and SHAP, the most popular model-agnostic post-hoc explainability methods are analyzed. LIME creates a simple linear construct through simplification of the model to a particular decision attribute while assessing its response based on masking some portions of the image; nevertheless, there is a possibility of mistaking causality with mere coincidence within this methodology. Conversely, SHAP, using the concept of cooperative game theory, computes the contribution of each individual pixel that constitutes the image. As SHAP considers every combination, it provides a safer mathematical basis and ethical reasoning for such methodologies. This study seeks to evaluate the transparency features of these tools through their mathematical principles.

The methodology consists of three related core components:

1. First, recent studies were analyzed to determine discrepancies in performance and interpretability of CNN and ViT implementations in industries like healthcare.
2. In the second component, theoretical analysis was conducted on the stability of heat maps generated by algorithms like LIME and SHAP in terms of their sensitivity to variations in input data, as well as possible pitfalls associated with misrepresentation and responsiveness to manipulation leading to confirmation bias.
3. Lastly, all findings were integrated with previous results from literature in the context of algorithmic fairness and consumer trust, with particular attention given to the necessity of establishing universal security measures for transparent decision-making systems.

III. Related Works

The clinical decision support systems based on artificial intelligence technologies are known for having high rates of success in medical diagnosis. Especially good results have been achieved in analyzing chest X-rays (CXR). Nowadays, the most promising solutions involve using CNNs, ViTs, as well as hybrid solutions ([2], [4], [5]). In turn, different architectures have their unique ways of visual perception. The CNN architecture implies layer-by-layer detection of local patterns. As for the ViT architecture, it became part of computer vision when Reference [1] presented it. Within the ViT model, the image is divided into patches, and distant visual relations are detected using self-attention mechanism.

Enhancing the performance of clinical applications is crucial. At the same time, there is another important issue connected to deep neural networks that involves millions of parameters and, therefore, a very complicated structure. Due to that, the decision-making process has become incomprehensible for humans. This phenomenon is known as the "black box" problem. To tackle this issue, explainable artificial intelligence (XAI) tools were invented to make the system transparent and justify decisions. Nowadays, the following techniques can be considered as the most popular XAI technologies [10]:

a) LIME *(Local Interpretable Model-Agnostic Explanations):* Simplifies a complicated model to create an interpretable linear representation based on a particular prediction. It identifies the local basis for the decision by applying masks to the input.

b) SHAP (*Shapley Additive Explanations*): Implements Shapley values. This method is based on game theory and analyzes all possible combinations of features. The method estimates the marginal effect of every pixel-level feature on the ultimate prediction.

Both techniques try to increase transparency. However, recent studies reveal the unreliability of these outputs ([8], [9]). Moreover, the role played by clinicians in this process remains disputable. Transparency is more than just a process of explanation; it is strongly connected to the interaction, trust, and fairness of AI algorithms.

The use of XAI outputs implies a variety of cognitive challenges; especially when the users have low experience in using them. First, automation bias and confirmation bias are key concerns among others. Unconditional reliance on visual explanations can mislead clinicians. Furthermore, AI models can rapidly learn demographic biases present in training data which leads to discriminatory and unfair decisions in clinical settings. Consequently, there is a clear research gap in the field. A comprehensive examination of the relationship between the technical limitations of XAI methods and the concepts of Human-Computer Interaction (HCI) and fairness is essential.

A. Model Performance and XAI Integration in Medical Imaging

Deep learning models in critical sectors like medicine are getting commonly used in the diagnosis of diseases like pneumonia and tuberculosis through radiological images. According to studies carried out by References [2] and [5]; CNN architecture, when aided by preprocessing techniques such as dynamic histograms, can achieve diagnostic accuracy rates comparable to expert physicians.

However, ViT architecture has outperformed CNN models in their performances due to the large amount of data provided in their training. As stated by the research findings conducted by Reference [4] customized ViT models have proven to detect tuberculosis in chest X-ray scans with remarkable accuracy, and in addition, they can perform visualization of medically significant lesions through XAI such as Grad-CAM. In addition, customized ViT architecture, when combined with XAI technologies like Grad-CAM, help to detect medically relevant lesions. Likewise, Reference [3] formulated hybrid ViT architectures called DAViT (Domain-adapted hybrid ViT). DAViT architecture not only analyzed globally but locally too. This ensures that the DAViT architectures attained high F1 scores in the classification of pneumonia in chest radiographs.

B. Technical Challenges and Cognitive Implications of XAI Methods

Although the clinical performance of the model increases, there has been significant criticism regarding the mathematical accuracy of local explainability algorithms such as LIME and SHAP. According to comprehensive systematic literature review by Reference [8], such input perturbation approaches have the potential to suffer from flaws in themselves, and the explanations that they offer cannot undergo stringent clinical assessment. In their study, Reference [9] proved mathematically that single-pixel changes used in LIME and SHAP lead to anatomically unrealistic explanations in spectroscopy and complex medical images.

Such technical shortcomings open the path towards dangerous psychological deviations in the context of human-computer interaction (HCI). While the research conducted by Reference [7] on neurodiagnosis proves that XAI explanations help enhance the level of clinicians' initial trust in AI, Reference [13] proved that specialists actually employ such technologies as *confirmation biases* instead of critically evaluating the system. Experiments based on surveys made by Reference [12] demonstrate that visual transparency can lead to the emergence of automation bias and support erroneous decision-making. In turn, based on the research findings of Reference [14], if the algorithm offers contradictory or wrong explanations, doctors are inclined to stick to their erroneous choices (boomerang effect). Such unconditional trust causes "learning myopia" that negatively impacts team efficiency ([11], [15]).

C. Algorithmic Justice and Social Ethics

According to current research, transparency is not only an issue of precision but also of legality and ethics. Extensive text mining studies on health analytics conducted by Reference [16] shows that the major barriers to achieving digital justice are demographic biases in data and model opacity. It is crucial for a model not to be socially biased when making decisions concerning various demographics.

On the other hand, Reference [6] suggests that the technique called "fairness through blindness," which assumes avoiding the usage of sensitive demographic features such as age and gender in order to prevent discrimination, often fails because implicit biases can occur by means of correlations in other characteristics. Thus, taking this into account, explainable methods cannot be seen as a quick fix of the problem. They need to become actively applied as an "ethical autopsy" tool for uncovering any potential biases in the data on which training algorithms were performed. From this perspective, the research demonstrates that mere technical transparency is insufficient; XAI methodologies must be strictly integrated as standardized safety protocols within the medical decision- making mechanisms.

IV. Results and Analysis

The literature reviewed in this study indicates both significant technical advancements and underlying risks of deep learning–based clinical decision support systems. The table below summarizes the architecture and key findings of the studies selected through the methodology, providing support for the theoretical approach adopted in this paper.

Table 1. Selected studies

Study	Studied Field	Model Used(XAI)	Theoretical/Empirical Findings
[5]	Medical Diagnosis (General)	CNN	CNNs achieve diagnostic accuracy at the level of expert physicians in medical diagnoses.
[2]	Chest Radiography	CNN, Dynamic Histogram	Preprocessing makes CNNs highly accurate for pneumonia
[1]	Computer Vision	ViT	Self-attention mechanism has established superiority over traditional local CNNs on massive datasets.
[4]	Tuberculosis Detection	ViT, Grad-CAM	Customized ViTs excel in detecting tuberculosis while effectively highlighting medically relevant lesions.
[3]	Pneumonia Classification	DAViT (Hybrid)	Hybrid architectures combining local and global features yield state-of-the-art clinical accuracy.
[10]	Biomedical XAI	LIME, SHAP	Current XAI methods lack rigorous human-subject validation and rely on problematic additive assumptions.
[8]	Systematic Reliability	LIME, SHAP	The majority of XAI explanations bypass stringent clinical validation and fail to involve medical experts.
[9]	Zone-based XAI	LIME, SHAP	Single-pixel perturbations inherently generate anatomically impossible and physically unrealistic medical data.
[7]	Neurodiagnosis & Trust	SHAP, Grad-CAM	Visual XAI explanations significantly accelerate and strengthen clinicians' initial trust in AI systems.
[15]	Clinical Communication Gap	CORONET Model	Rather than fostering critical evaluation, clinicians frequently use XAI outputs to justify their pre-existing confirmation biases.
[12]	Cognitive Safety	Conceptual Validation	Convincing visual transparency can easily trigger automation bias, leading users to blindly trust erroneous AI decisions.
[13]	Black Box	ST-GCN	Over-reliance on AI outputs erodes institutional cognitive diversity and cultivates clinical "learning myopia".
[14]	Clinical Alerts	XAI (Thematic Analysis)	As clinicians gain expertise, their reliance on XAI decreases, and they become more tolerant of contradictory explanations.
[11]	Team Performance	Scoping Review	Contrary to expectations, the mere presence of XAI does not inherently improve human-AI team performance
[16]	Health Analytics Ethics	Unsupervised Text Mining	Model opacity and demographic biases embedded in datasets remain the primary threats to digital equity in healthcare.
[6]	Ethics and Fairness	Conceptual Analysis	The "fairness through blindness" strategy of removing demographic data is highly insufficient to prevent algorithmic discrimination.

In the field of medical imaging, deep learning models such as CNNs and ViTs have been proven to be effective for diagnostics in many ways, being able to reach comparable or superior results to expert human analysis. According to studies conducted by References [2] and [5], CNNs are effective tools in identifying diseases such as pneumonia, while the most recent developments demonstrate that ViTs are capable of understanding the local as well as the global contexts in a visual image. Even though the development of such powerful models in medical imaging may be a technological breakthrough, their deployment in clinical settings faces some challenges due to their nature of being highly epistemically opaque. The complexity of millions of parameters within these deep learning models makes them *black boxes* with no transparency in

how decisions are made. Therefore, there is a clear trade-off between high-performing algorithms and the lack of mechanisms to ensure accountability.

Despite the popular use of such methods as LIME and SHAP, which aim to reduce this problem, their mathematical basis leaves gaps in their validity when used to analyze complex medical information. The model-agnostic approaches are mostly based on perturbing inputs; using masks on single pixels to estimate decision borders locally. As References [8] and [9] argue, structures in medical imaging are strongly correlated, and therefore changing isolated pixels can result in creating artificial and unreal data points. The heat maps created in this way may mislead about true areas of focus and assign significance to random and logically contradictory places. Moreover, according Reference [10], additive independence assumptions do not account for the complicated interaction patterns between biomedical variables.

In addition to mathematical inaccuracies, XAI methods may trigger severe cognitive biases among the users of such systems. Despite the initial increase in clinicians' confidence when presented with visualization of decision processes, such transparency may result in several negative consequences. According to researchers rather than promoting critical thinking, doctors use explanations offered by algorithms to confirm their diagnoses: reinforcing confirmation biases. In turn, References [12] and [13] prove that highly persuasive visualizations of explanations may lead to automation biases, making people accept wrong recommendations from algorithms. The same may occur if explanations contradict one another, resulting in the boomerang effect. In such cases, medical experts tend to be more certain about wrong choices. Unconditional acceptance of algorithmic results may reduce diversity in decision-making and critical thinking skills of experts in the field, eventually developing "learning myopia".

Other than individual biases, the problem of opacity further contributes to algorithmic unfairness and inequity in the field of digital medicine. AI models typically encode and perpetuate social biases present in their datasets. Thereby they can produce discriminatory clinical results. In accordance with Reference [6], the concept of *fairness through blindness* is not entirely effective because of other implicit factors that correlate with those attributes. According to Reference [16], this intersection of demographic bias and opacity constitutes the major obstacle to achieving equitable health informatics. For that reason, XAI technologies must be seen as more than just supplementary visualization software but rather as standardized *ethical autopsies* for machine learning technology.

V. Conclusion and Future Work

Integrating deep learning models into medical imaging leads to highly accurate medical diagnoses. However, their black box characteristic is an urgent issue that cannot be ignored before integrating these systems. As such, model-agnostic explainable artificial intelligence tools like LIME and SHAP have been used to overcome this challenge, but they have several major drawbacks. The application of single-pixel perturbation results in anatomically implausible explanations because the input features used in the models are extremely correlated. This weakness creates an enormous threat in terms of their effectiveness when applied to biomedicine.

Moreover, misleading visual transparency creates considerable cognitive risks for experts who employ these tools. Experts can suffer from automation bias or utilize explanations provided by the model just to prove their confirmation biases. This will cause a decline in the level of reasoning and the development of learning myopia among experts. Additionally, existing XAI tools alone are insufficient for ensuring algorithmic fairness. The traditional strategy of simply hiding sensitive demographic variables fails to prevent discriminatory clinical outcomes.

Future research must transcend the limitations of localizing explanations in individual pixels. In order to analyze clinical datasets properly, it is critically important to create anatomically consistent and zone-based approaches within XAI frameworks. Furthermore, explainability cannot simply serve as a secondary visual feature; it needs to be established as an audit standard for doing what can be called *ethical autopsies*. Priority of human-in-the-loop methods (which can track any representational biases that may occur beneath the surface) should be taken into consideration.

References

[1] A. Dosovitskiy et al., "An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale," in *Proc. International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2021.

[2] D. Zhang, F. Ren, Y. Li, L. Na, and Y. Ma, "Pneumonia Detection from Chest X-ray Images Based on Convolutional Neural Network," *Electronics*, vol. 10, p. 1512, 2021.

[3] M. Fu, C. Tantithamthavorn, and T. Le, "DAVIT: A domain-adapted vision transformer for automated pneumonia detection and explanation using chest X-ray images," *IEEE Access*, 2025.

[4] K. Vanitha, T. R. Mahesh, V. V. Kumar, and S. Guluwadi, "Enhanced tuberculosis detection using Vision Transformers and explainable AI with a Grad-CAM approach on chest X-rays," *BMC Medical Imaging*, vol. 25, p. 96, 2025.

[5] D. S. Kermany et al., "Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning," *Cell*, vol. 172, no. 5, pp. 1122-1131, 2018.

[6] B. Lepri, N. Oliver, E. Letouzé, A. Pentland, and P. Vinck, "Fair, Transparent, and Accountable Algorithmic Decision-making Processes: The Premise, the Proposed Solutions, and the Open Challenges," *Philosophy & Technology*, vol. 31, pp. 611-627, 2018.
[7] K. S. V. Angu Bala Ganesh, V. P. Mishra, A. Jayanthiladevi, and A. K. Verma, "Building clinician trust in AI-assisted neurodiagnostics: A case-based evaluation," *Interdisciplinary Neurosurgery: Advanced Techniques and Case Management*, vol. 42, p. 102144, 2025.
[8] Y. A. Mohamed, B. E. Khoo, M. S. M. Asaari, M. E. Aziz, and F. R. Ghazali, "Decoding the black box: Explainable AI (XAI) for cancer diagnosis, prognosis, and treatment planning-A state-of-the art systematic review," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 193, p. 105689, 2025.
[9] J. Contreras, A. Winterfeld, J. Popp, and T. Bocklitz, "Spectral Zones-Based SHAP/LIME: Enhancing Interpretability in Spectral Deep Learning Models Through Grouped Feature Analysis," *Analytical Chemistry*, vol. 96, pp. 15588-15597, 2024.
[10] N. Hettikankanamage et al., "eXplainable Artificial Intelligence (XAI): A Systematic Review for Unveiling the Black Box Models and Their Relevance to Biomedical Imaging and Sensing," *Sensors*, vol. 25, p. 6649, 2025.
[11] H. V. Subramanian, C. Canfield, and D. B. Shank, "Designing explainable AI to improve human-AI team performance: A medical stakeholder-driven scoping review," *Artificial Intelligence In Medicine*, vol. 149, p. 102780, 2024.
[12] S. Pareek, N. van Berkel, E. Velloso, and J. Goncalves, "Effect of Explanation Conceptualisations on Trust in AI-assisted Credibility Assessment," *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, vol. 8, no. CSCW2, Art. 383, 2024.
[13] R. Hassan et al., "Unlocking the black box: Enhancing human-AI collaboration in high-stakes healthcare scenarios through explainable AI," *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 219, p. 124265, 2025.
[14] J. Rahman et al., "The Role of Explanations in AI-Generated Alerts: Qualitative Study of Clinical Views on Explainable AI in Predictive Tools," *JMIR Human Factors*, vol. 13, p. e81460, 2026.
[15] O. Wysocki et al., "Assessing the communication gap between AI models and healthcare professionals: Explainability, utility and trust in AI-driven clinical decision-making," *Artificial Intelligence*, vol. 316, p. 103839, 2023.
[16] M. I. Arias, L. Cadavid, and J. D. Velásquez, "Advancing healthcare analytics: a thematic review of machine learning, health informatics, and real-world data applications," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 171, p. 104934, 2025.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Seramik Membran Proseslerinin Uygulanması

Dilşad Elif Öztürk[a], Neslihan Manav-Demir[a]*

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

ÖZET

Son yıllarda metal kaplama endüstrisi, üretim süreçlerinde kullanılan kimyasal banyolar, durulama aşamaları ve yüzey hazırlık adımları sebebiyle, su tüketimi ve atıksu oluşumu açısından önde gelen sanayi kollarından biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, metal kaplama endüstrisinden kaynaklanan atıksuların, kimyasal arıtma ile birleşik bir flotasyon prosesi ile entegre edilmiş bir seramik membran sistemi kullanılarak geri kazanımı araştırılmıştır. Elde edilen çıkış suyunun kalite parametreleri, metal kaplama sektöründe proses suyu olarak yeniden kullanımına uygunluğunu belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Çözünmüş hava flotasyonu (DAF) sonrasında uygulanan seramik membran ile elde edilen giderim verimleri; kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) için %46,2 ± 2, Cu için %74 ± 2,4, Ni için %84,4 ± 1,5, Zn için %80,4 ± 1,1, CN^- için %91,2 ± 1,2, Cr^{6+} için %63,2 ± 4,6 ve SO_4^{2-} için %80,6 ± 1,4 olarak belirlenmiştir. Proseste elde edilen giderim verimlerine göre, bu çalışmada kullanılan seramik membran teknolojisinin, metal kaplama endüstrisi tarafından üretilen atıksuların arıtımı için etkili, güvenilir ve teknik açıdan uygulanabilir bir alternatif oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Atıksu arıtımı, Metal kaplama atıksuyu, Seramik membran.*

Application of Ceramic Membrane Processes in the Treatment of Metal Plating Industry Wastewater

ABSTRACT

In recent years, the metal plating industry has become one of the leading industrial sectors in terms of water consumption and wastewater generation due to the chemical baths, rinsing stages, and surface preparation steps. This study investigates the recovery of wastewater generated from the metal plating industry through a ceramic membrane system integrated with a chemical treatment-coupled flotation process. The quality parameters of the obtained effluent were assessed to determine its suitability for reuse as process water within the metal plating sector. The removal efficiencies achieved by the ceramic membrane applied following the dissolved air flotation (DAF) process were determined to be 46.2 ± 2% for chemical oxygen demand (COD), 74 ± 2.4% for Cu, 84.4 ± 1.5% for Ni, 80.4 ± 1.1% for Zn, 91.2 ± 1.2% for CN^-, 63.2 ± 4.6% for Cr^{6+}, and 80.6 ± 1.4% for SO_4^{2-}. Based on the removal efficiencies obtained during the process, it was concluded that the ceramic membrane technology employed in this study constitutes an effective, reliable, and technically feasible alternative for the treatment of wastewater generated by the metal plating industry.

Keywords: *Ceramic membrane, Metal plating wastewater, Wastewater treatment.*

I. INTRODUCTION

Metal plating processes are critical manufacturing methods widely employed across industry for the purposes of enhancing surface properties, improving corrosion resistance, increasing wear resistance, and meeting aesthetic requirements. These processes play a significant role in a broad range of industrial and commercial applications, most notably in the fabrication of various components for the modern automotive sector, the manufacturing and assembly of commercial aircraft, and the minting of coins. The metal plating industry has become one of the leading industrial sectors in terms of water consumption and wastewater

generation, primarily owing to the extensive use of chemical baths, rinsing stages, and surface preparation steps involved in the production process. In Istanbul alone, more than 200 metal plating facilities are currently in operation, each estimated to consume a minimum of 500 to 1,000 m^3 of water for process operations. As the importance of water resources becomes increasingly recognized, the treatment of these effluents is gaining growing attention. Of particular concern is the contamination of the natural environment with toxic compounds resulting from heavy metal-rich wastewaters, which has become a critical environmental and public health issue.

In natural ecosystems, heavy metals are characterized by their high mobility, relatively high chemical stability, and carcinogenic properties. Due to their non-biodegradable nature, they accumulate in the environment and represent one of the most hazardous classes of contaminants, posing a serious risk to human health [1]. Coagulation–flocculation, precipitation, adsorption, membrane filtration, ion exchange, electrodialysis, electroflotation, electrocoagulation, electrooxidation, and advanced oxidation processes (AOPs) are among the most widely applied and effective techniques for the treatment and reduction of industrial wastewaters [2]. In addition, various membrane-based approaches have been extensively adopted for the treatment of metal plating effluents.

Compared to conventional physicochemical treatment methods, membrane-based processes offer distinct advantages, including lower energy consumption and reduced sludge production [3]. Membrane technology has been increasingly utilized in water and wastewater treatment in recent years due to its operational versatility and significant potential arising from minimal or zero chemical reagent requirements [4]. Although numerous membrane types are currently employed for wastewater treatment purposes, ceramic membranes present considerably greater advantages over organic polymeric membranes used in industrial applications [5]. Their superior chemical stability, high mechanical strength, and thermal resistance [6], [7], [8], [9] extended operational lifespan [7], [8], [9], enhanced acid–alkali resistance [8], reduced fouling tendency relative to polymeric membranes [9], ease of cleaning and regeneration [8], [10], and high separation efficiency [7], [11] have collectively contributed to the growing utilization of ceramic membranes for heavy metal removal from industrial effluents.

Within the scope of the present study, a ceramic membrane process with design characteristics consistent with those of ultrafiltration (UF) membranes was selected. The metal plating wastewater used in this study was first subjected to chemical treatment coupled with a dissolved air flotation (DAF) unit as a pre-treatment step, following which the treatment performance and wastewater recovery potential of the ceramic membrane system were evaluated. The removal efficiencies of the ceramic membrane for COD, Cu, Ni, Zn, CN^-, Cr^{6+}, and SO_4^{2-} following pre-treatment were also investigated.

II. Materials and Methods

A. Wastewater Characterization

The metal plating industry wastewater used in this study was sampled from the effluent of a chemical treatment and dissolved air flotation (DAF) unit. The physicochemical characteristics of the wastewater were as follows: pH 7.6 ± 0.3; COD 70 ± 5.5 mg/L; Cu 0.97 ± 0.2 mg/L; Ni 0.318 ± 0.021 mg/L; Zn 0.08 ± 0.005 mg/L; CN^- 0.086 ± 0.023 mg/L; Cr^{6+} 0.021 ± 0.003 mg/L; SO_4^{2-} 245 ± 20.9 mg/L.

B. Seramic Membrane System

The ceramic membrane system employed in this study consisted of the following components: (1) tubular membranes for efficient wastewater recovery; (2) a housing tank for the tubular membranes; (3) an electromagnetic flow meter; (4) a temperature sensor for monitoring wastewater temperature; (5) pressure gauges for measuring the inlet pressure to the membranes; (6) a TSS sensor for quantifying suspended solid content at the membrane inlet; (7) electromagnetic coupling equipment between the housing and the membranes; (8) internal connecting fittings within the housing; (9) chemical preparation tanks and mixers for the cleaning reagents; and (10) chemical dosing pumps and an air generator for backwashing operations. The operating principle of the ceramic membrane system is illustrated in Figure 1.

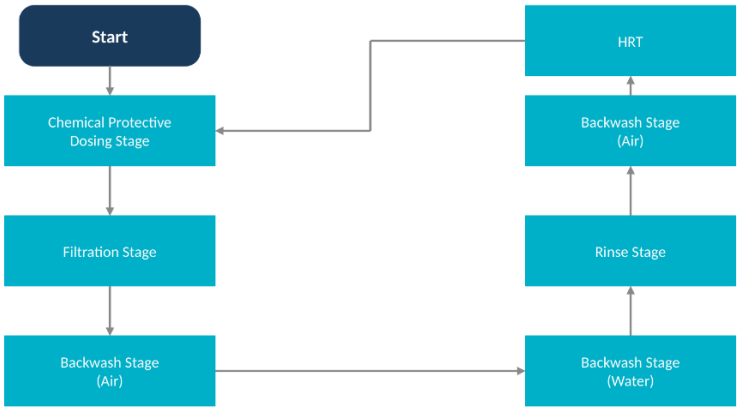


Figure 1. Operating principle of the ceramic membrane system

The key design specifications of the ceramic membrane were as follows: overall dimensions of 50 mm × 35 mm × 330 mm; effective pore diameter in the range of 0.1–2 μm; and a membrane weight of 780 g. The operating transmembrane pressure was 0.2 MPa and the operating temperature was 25°C. The active surface area of each individual membrane element was approximately 0.052 m^2, yielding a total active membrane surface area of 0.26 m^2. The flow rate during backwashing was maintained at 1 m^3/h. Detailed views of the internal design of the ceramic membrane system are presented in Figure 2.

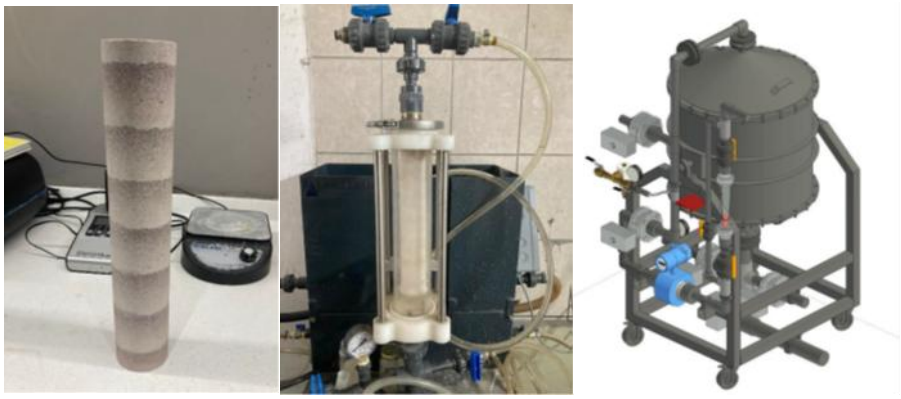


Figure 2. Internal design of the ceramic membrane element (left to right: inner-to-outer cross-sectional view)

The fully assembled ceramic membrane system is shown in Figure 3.



Figure 3. Ceramic membrane system a) exterior view of the control panel, b) interior view of the control panel, c) complete system

With regard to the operating conditions of the system, a programmable logic controller (PLC)-based automation platform with dedicated remote monitoring and control software was integrated to enable continuous supervision of the process. Experiments were conducted over five consecutive days with eight-hour daily operational periods; process parameters were logged automatically at 30-minute intervals. To maintain stable membrane performance, backwashing was performed at six-hour intervals. The membranes were automatically triggered into backwash mode after every 5 m^3 of treated wastewater. The backwashing sequence comprised four stages: (1) draining the membrane tank and air backwashing of the membranes; (2) water backwashing; (3) rinsing; and (4) a second air backwash cycle.

III. RESULTS

In the pilot-scale study conducted on metal plating wastewater treatment using the ceramic membrane process, flux and pressure variations throughout the operational period were systematically monitored and recorded via the PLC-based automation system. The flux (LMH) and transmembrane pressure (TMP) profiles recorded over the monitoring period are presented in Figure 4 and Figure 5, respectively.

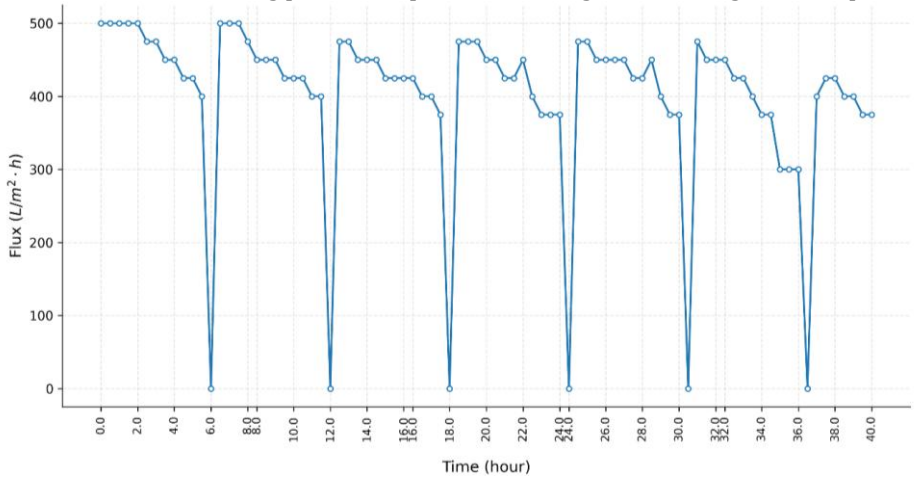


Figure 4. Flux variaton over the operational period

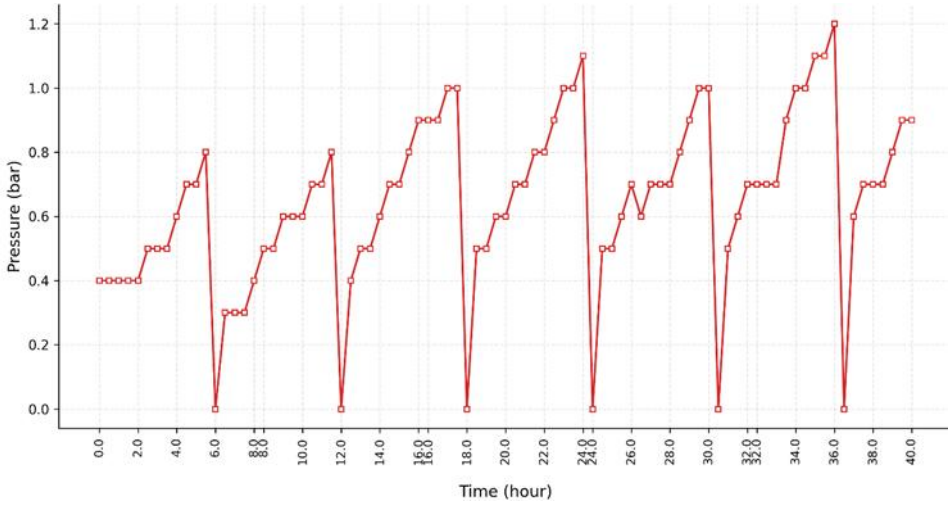


Figure 5. Transmembrane pressure (TMP) variation over the operational period

The influent and effluent concentrations of the target pollutant parameters (COD, Cu, Ni, Zn, CN^-, Cr^{6+}, $SO4^{2-}$) and the corresponding removal efficiencies achieved by the ceramic membrane are summarized in Table 1.

Table 1. Removal efficiencies of the ceramic membrane

Parameter (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
COD	70 ± 5.5	40 ± 4.7	46.2 ± 2
Cu	0.97 ± 0.2	0.26 ± 0.02	74.0 ± 2.4
Ni	0.318 ± 0.021	0.057 ± 0.006	84.4 ± 1.5
Zn	0.077 ± 0.005	0.018 ± 0.003	80.4 ± 1.1
CN^-	0.086 ± 0.023	0.008 ± 0.001	91.2 ± 1.2
Cr^{+6}	0.021 ± 0.003	0.01 ± 0.002	63.2 ± 4.6
SO_4^{2-}	245 ± 20.9	55 ± 6.8	80.6 ± 1.4

IV. DISCUSSION

As shown in Figure 4, backwashing was carried out at six-hour intervals throughout the experimental period to preserve membrane performance. Since the system was temporarily shut down during each backwashing event, flux values of zero recorded during these intervals are clearly indicated on the graph to maintain data integrity. Following each approximately one-minute backwash cycle, the system was

restarted and flux monitoring resumed without interruption. The measured flux declined gradually from an initial value of approximately 500 L/m^2·h (LMH) at the start of operation to below 400 L/m^2.h by the end of the experimental period. The observed flux variation in this study is in agreement with previously reported findings in the literature [12], [13], [14].

The inlet pressure, measured at approximately 0.4 bar at the onset of the experimental process, exhibited a gradual increase over the operational period as a consequence of progressive pore blockage and fouling effects at the membrane surface, ultimately reaching 1.2 bar. These values fall within the range of 0.3 to 2 bar reported for ceramic membrane systems in the literature [15], [16], [17].

[18] reported a COD rejection of 44% at 25°C and 1.3–7 bar using a ceramic membrane. [19] reported a 78.6% removal of chromium in their study using a ceramic membrane, whereas [20] reported over 95% rejection of Cu, Fe, Mn, Ni, and Zn using an electrocoagulation–ceramic membrane filtration system. Numerous studies have reported removal efficiencies of 99% or greater using ceramic membrane filtration [21].

V. Inference

Considering the effluent quality parameters and the high removal efficiencies achieved in the present work, the ceramic membrane technology applied herein was demonstrated to represent an effective, reliable, and technically viable alternative for the treatment of metal plating industry wastewater. Furthermore, the compliance of the treated effluent with the industrial water quality criteria defined in ASTM D1193 and the technical specifications for process water in metal plating operations set out in ISO 15730 confirms that ceramic membranes offer significant benefits not only from an environmental perspective, but also in terms of process water recovery and reuse potential. Accordingly, ceramic membrane systems can be considered a practical and sustainable solution for the management of metal plating wastewater.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) for financial support provided under project number 119C080. The authors also extend their thanks to Artemis Treatment, Project, Construction, Analysis, Consultancy Services, Industry and Trade Co. Ltd.

References

[1] S. Charażińska, P. Lochyński, E. Burszta-Adamiak. "Removal of heavy metal ions from acidic electrolyte for stainless steel electropolishing via adsorption using Polish peats," *Journal of Water Process Engineering*, 42, 2021.

[2] S. Rajoria, M. Vashishtha, V.K. Sangal. "Treatment of electroplating industry wastewater: a review on the various techniques," *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 72196–72246, 2022.

[3] E. Hosseinipour, S. Ly, P.A. Davies. "Efficient treatment of metal plating wastewater: Comparing batch nanofiltration (NF) vs. batch reverse osmosis (RO) for component reuse," *Desalination*, 615, 119292, 2025.

[4] E.O. Ezugbe, S. Rathilal. "Membrane technologies in wastewater treatment: A review," *Membranes*, 10, 89, 2020.

[5] A.K. Khalil, A. Elgamouz, S. Nazir, M.A. Atieh, H. Alawadhi, T. Laoui. "Preparation and characterization of clay-based ceramic porous membranes and their use for the removal of lead ions from synthetic wastewater with an insight into the removal mechanism," *Heliyon*, 10, 24939, 2024.

[6] Z. Li, W. Chen, F. Yang, Y. Wang, S. Cui, Q. Li, Z. Nie, Q. Wei. "Porous ceramic membranes fabricated mainly from red mud for oily wastewater treatment," *Separation and Purification Technology*, 364, 132519, 2025.

[7] C. Cai, W. Sun, S. He, Y. Zhang, X. Wang. "Ceramic membrane fouling mechanisms and control for water treatment," *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17, 126, 2023.

[8] Y. Zhang, Y. Tan, R. Sun, W. Zhang. "Preparation of ceramic membranes and their application in wastewater and water treatment," *Water*, 15, 3344, 2023.

[9] F.E.B. Coelho, D. Deemter, V.M. Candelario, V. Boffa, S. Malato, G. Magnacca. "Development of a photocatalytic zirconia-titania ultrafiltration membrane with anti-fouling and self-cleaning properties," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 106671, 2021.

[10] H. Qin, W. Guo, X. Huang, P. Gao, H. Xiao. "Preparation of yttria-stabilized ZrO_2 nanofiltration membrane by reverse micelles-mediated sol–gel process and its application in pesticide wastewater treatment," *Journal of the European Ceramic Society*, 40, 145–154, 2020.

[11] Y. You, J. Guo, J. Jiang. "Insight into the performance and fouling characteristics of submerged ceramic membrane bioreactor in wastewater treatment," *Journal of Environmental Management*, 373, 123900, 2025.

[12] N.A. Alhussain, M.K. Nazal, N. Baig. "Marine-inspired chitosan-coated ceramic membranes for efficient oil-in-water emulsion separation," *Results in Surfaces and Interfaces*, 21, 100668, 2025.

[13] E.S. do Carmo, W.L. Silva, A. dos S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues. "Low-cost ceramic membrane production for dye removal," *Desalination and Water Treatment*, 320, 100326, 2024.

[14] M. Echakouri, A. Henni, A. Salama. "A novel modeling optimization approach for a seven-channel titania ceramic membrane in an oily wastewater filtration system based on experimentation, full factorial design, and machine learning," *Membranes*, 14, 199, 2024.

[15] Y. Gao, D. Zou, Z.X.N. Low, Z. Zhong, W. Xing. "3D-printing enables geometry-optimized ceramic membranes with minimized mass transfer resistance for environmental application," *Green Energy & Environment*, 10, 2025.

[16] Baig, U., Dastageer, M.A., “Facile fabrication of nanostructured titanium dioxide loaded graphene sheets coated ceramic membrane with superhydrophilic and underwater superoleophobic nature for water treatment,” *Results in Physics*, vol. 58, pp. 107483, 2024.
[17] L.A. Xavier, G.V.G. Lesak, T.V. de Oliveira, D. Eiras, F.A.P. Voll, R.B. Vieira. "Ceramic membrane applied to seawater pre-treatment: effect of flocculation and temperature on microfiltration," *Desalination and Water Treatment*, 310, 43–49, 2023.
[18] M. Al-Haddabi, H. Vuthaluru, H. Znad, M. Chen, M. Ahmed. "Purification of oil produced water using ceramic membrane: an experimental and response surface model analysis," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 12, 101288, 2025.
[19] D. Jiang, C. Gao, L. Liu, T. Yu, Y. Li, H. Wang. "Application of nanoporous ceramic membrane derived from Fe/S/Si/Al/O-rich mining solid waste in oil–water separation and heavy metal removal of industrial high concentrated emulsifying wastewater," *Separation and Purification Technology*, 295, 121317, 2022.
[20] C. Atallah, S. Mosadeghsedghi, S.L.D. Kenaria, M. Hudder, L. Morin, K. Volchek, S. Mortazavi, I.B. Salah. "Removal of heavy metals from mine water using a hybrid electrocoagulation-ceramic membrane filtration process," *Desalination and Water Treatment*, 320, 100730, 2024.
[21] S.L.D. Kenari, S. Mortavazi, S. Mosadeghsedghi, C. Atallah, K. Volchek. "Advancing ceramic membrane technology for sustainable treatment of mining discharge: challenges and future directions," *Membranes*, 15, 112, 2025.
[22] T. Kıvak. “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts,” *Measurement*, 50, 19-28, 2014.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Dijital Dezenformasyonla Mücadelede MD5 Doğrulama Tabanlı Video Kesit Analizi ve Doğrulama Sistemi

Serdar Kırışoğlu[a], Kurban Kotan[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
[b]Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Bölümü, Manisa/Türkiye.
*** Sorumlu Yazar:** serdarkirisoglu@duzce.edu.tr

ÖZET

Dijital medya araçlarının ve sosyal ağların küresel ölçekte yaygınlaşması, resmî kurumlar tarafından paylaşılan stratejik video içeriklerinin manipüle edilerek veya bağlamından koparılarak dezenformasyon amacıyla kullanılması riskini artırmıştır. Kamuoyunu yanıltmaya yönelik bu girişimler, toplumsal güveni sarsan ciddi bir bilgi güvenliği sorunu haline gelmiştir. Bu çalışma, devlet kanalları ve resmi otoriteler tarafından yayınlanan orijinal video içeriklerinin, sosyal medya mecralarında paylaşılan farklı uzunluktaki kesitleriyle hızlı ve kesin bir şekilde karşılaştırılmasını sağlayan MD5 tabanlı bir dijital doğrulama sistemi önermektedir. Geliştirilen sistem, sosyal medyadaki şüpheli bir video kesitinin başlangıç ve bitiş zaman kodlarını referans alarak, merkezi sunucuda barındırılan orijinal kaynaktan ilgili aralığı dinamik bir şekilde ayrıştırmakta ve her iki veri bloğunun MD5 kriptografik özet değerlerini anlık olarak hesaplamaktadır. MD5 algoritmasının veri bütünlüğü üzerindeki yüksek hassasiyeti sayesinde, sistemin görüntü pikselleri, renk dengesi veya ses dalgaları üzerindeki en ufak bir değişikliği dahi %100 doğrulukla tespit edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, video çözünürlüğü değişikliklerinin hash değerleri üzerindeki etkileri ve resmi bir merkezi video veri havuzu oluşturulmasının dezenformasyonla mücadeledeki stratejik önemi detaylıca tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Bilgi güvenliği, Dezenformasyon, Hash algoritmaları, MD5, Video doğrulama.*

An MD5-Based Video Clip Analysis and Verification System for Combating Digital Disinformation

ABSTRACT

The widespread adoption of digital media tools and social networks on a global scale has increased the risk that strategic video content shared by government agencies could be manipulated or taken out of context for the purpose of spreading disinformation. These attempts to mislead the public have become a serious information security issue that undermines social trust. This study proposes an MD5-based digital verification system that enables the rapid and accurate comparison of original video content published by state channels and official authorities with clips of varying lengths shared on social media platforms. The developed system references the start and end timestamps of a suspicious video clip on social media, dynamically extracts the relevant segment from the original source hosted on a central server, and instantly calculates the MD5 cryptographic hash values of both data blocks. Thanks to the MD5 algorithm's high sensitivity to data integrity, it has been concluded that the system detects even the slightest alteration in image pixels, color balance, or audio waves with 100% accuracy. Additionally, the effects of changes in video resolution on hash values and the strategic importance of establishing an official central video data repository in combating disinformation are discussed in detail.

Keywords: *Disinformation, Hash algorithms, Information security, MD5, Video verification.*

I. GİRİŞ

Bilgi teknolojilerindeki hızlı gelişim bilginin yayılma hızını artırırken doğruluğunun teyidini güçleştirmektedir. Video içerikleri izleyiciler üzerinde en yüksek ikna kabiliyetine sahip medya türü olduğundan dezenformasyon faaliyetlerinin odak noktası hâline gelmiştir [1, 2]. Resmî kurumların açıklamalarından alınan kesitlerin montajlanması veya bağlam dışı sunulması dijital çağın en büyük güvenlik tehditlerinden birini oluşturmaktadır.

Sosyal medya kullanıcı tabanının 5 milyarı aşmasıyla yanlış bilginin yayılma hızı dramatik biçimde artmış; araştırmalar yanlış haberlerin doğru haberlere kıyasla altı kat daha hızlı yayıldığını ortaya koymuştur [1]. Deepfake teknolojisinin 2022-2023 yılları arasında on katına çıkması, ölçeklenebilir otomatik doğrulama sistemlerine duyulan ihtiyacı kritik hâle getirmektedir [3].

Mevcut doğrulama araçları genel olarak üç kategoride değerlendirilebilir: (i) görsel-işitsel analiz, (ii) meta veri incelemesi ve (iii) kriptografik özet (hash) tabanlı yöntemler [4]. İlk iki kategori insan müdahalesi gerektirdiğinden yüksek hacimli içerik doğrulamalarında yetersiz kalmaktadır. C2PA standardı medyanın kaynağını kriptografik imzayla güvence altına almayı amaçlasa da sosyal medya platformlarında meta veri silme pratikleri nedeniyle kullanımı henüz sınırlıdır [5].

Bu çalışmanın özgün katkısı, zaman kodlu dinamik segment karşılaştırmasına dayanan MD5 tabanlı bir otomasyon çerçevesi sunmasıdır. Önerilen sistem; merkezi bir resmî video arşivi ile entegre çalışarak herhangi bir sosyal medya kesitinin orijinal videodaki karşılığını milisaniye hassasiyetinde bulup kriptografik özet değerlerini anlık olarak karşılaştırmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada istemci-sunucu mimarisine dayanan dinamik zaman aralıklı bir hash karşılaştırma modeli önerilmektedir. Sistemin teknik altyapısı beş ana katmandan oluşur: MD5 tabanlı doğrulama motoru, zaman kodlu indeksleme ünitesi, referans veri havuzu, API ağ geçidi ve sonuç modülü (bkz. Tablo 2 ve Şekil 1).

A. Referans Veri Havuzu ve Arşivleme Sistemi

Bu katman, sistemin "doğruluk kaynağı (ground truth)" olarak hizmet eder ve resmî kurumlar ile devlet kanalları tarafından yayınlanan videoların ham hâllerini barındırır [6]. Videolar herhangi bir sosyal medya platformuna yüklenmeden önce yüksek bit hızında (MP4, H.264) saklanır. Her video sunucuya yüklendiğinde yayın tarihi, video kimliği, kare hızı (FPS) ve toplam kare sayısını içeren meta veriler veri tabanına kaydedilir.

B. MD5 Algoritması ve Kriptografik Özetleme

RFC 1321 standartlarında tanımlanmış 128 bitlik bir karma fonksiyon olan MD5, veri bütünlüğünün korunması için kullanılır [7]. Girdi verisindeki tek bir bitlik değişiklik bile Çığ Etkisi (Avalanche Effect) nedeniyle tamamen farklı bir özet üretir. MD5 çarpışma saldırılarına karşı zafiyetler taşıdığından [8] dijital imza amacıyla değil, yalnızca veri bütünlüğü doğrulama amacıyla kullanılmaktadır. Denklem 1:

$$\mathbf{MD5(M) = F_4(F_3(F_2(F_1(IV, M_0), M_1), M_2), M_3) \quad ...(1)}$$

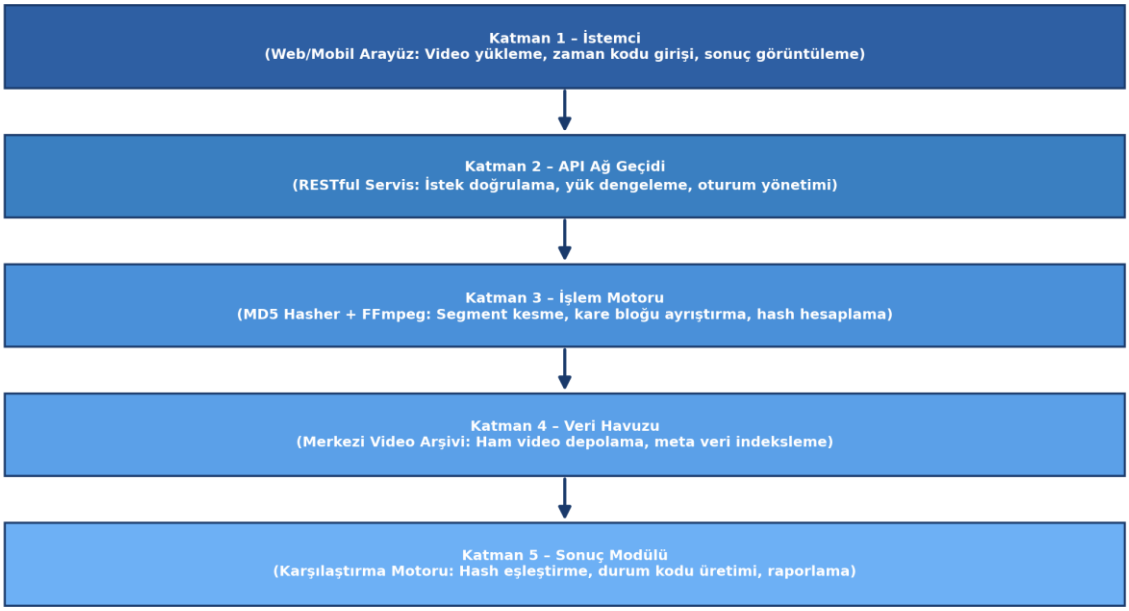
C. Dinamik Zaman Aralıklı Doğrulama Akışı

Sistemin algoritmik çalışma mantığı beş adımdan oluşmaktadır (bkz. Şekil 2):

1. Girdi Analizi: Şüpheli video (V_{sh}) ve referans video ID'si sisteme iletilir.
2. Zaman Kodu Tespiti: Kesitin başladığı (t_{start}) ve bittiği (t_{end}) saniyeler belirlenir.
3. Hizalama ve Kesme: Orijinal videonun [t_{start}, t_{end}] aralığına karşılık gelen kare blokları FFmpeg ile ayrıştırılır.
4. Hash Hesaplama: $H_{org} = MD5(V_{org}[t_{start}...t_{end}])$ ve $H_{sh} = MD5(V_{sh})$ hesaplanır.
5. Mantıksal Karşılaştırma: $H_{org} = H_{sh} \rightarrow$ "Orijinal" onayı; $H_{org} \neq H_{sh} \rightarrow$ "Manipüle Edilmiştir" uyarısı.

Tablo 1. Önerilen Video Doğrulama Sisteminin Katmanlı Mimarisi

Katman	Bileşen	Görev	Teknoloji
Katman 1 – İstemci	Web/Mobil Arayüz	Video yükleme, zaman kodu girişi, sonuç görüntüleme	HTML5, JS
Katman 2 – API Geçidi	RESTful Servis	İstek doğrulama, yük dengeleme	Python/FastAPI
Katman 3 – İşlem	MD5 + FFmpeg	Segment kesme, hash hesaplama	Python 3.11
Katman 4 – Arşiv	Video Deposu	Ham video ve meta veri depolama	PostgreSQL, S3
Katman 5 – Sonuç	Karşılaştırma	Hash eşleştirme, raporlama	Python, JSON



Şekil 1. Önerilen MD5 Tabanlı Video Doğrulama Sisteminin Katmanlı Mimarisi

III. Deneysel Kurulum

Önerilen sistemin başarımını değerlendirmek amacıyla kontrollü bir deneysel ortam oluşturulmuştur. Test altyapısı iki sunucu düğümü üzerinde kurulmuş; birinci düğüm merkezi video arşivi olarak yapılandırılmış, ikinci düğüm istemci simülasyonu ve doğrulama motoru görevini üstlenmiştir. Toplam 50 test senaryosu gerçekleştirilmiş; her senaryo farklı video uzunluklarını, çözünürlük kombinasyonlarını ve manipülasyon türlerini kapsamaktadır.

A. Test Ortamı ve Kullanılan Araçlar

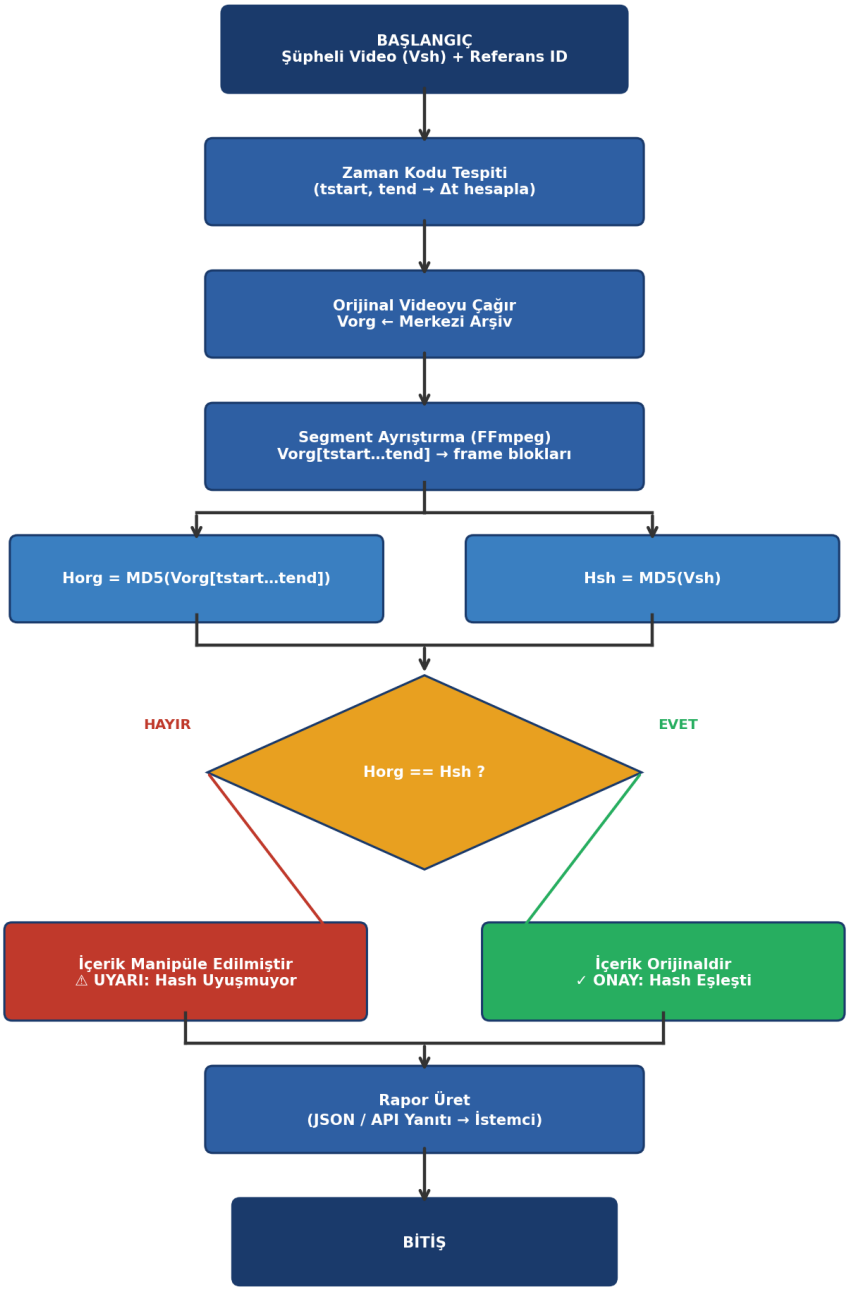
Sunucu donanımı olarak Intel Xeon E5-2670 işlemci ve 32 GB RAM kullanılmış; işletim sistemi Ubuntu 22.04 LTS olarak belirlenmiştir. Video işleme katmanında FFmpeg 6.0 kütüphanesi tercih edilmiş olup MD5 hash hesaplamaları Python 3.11 hashlib modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm test videoları H.264 kodlayıcı ile MP4 formatında, 25 ve 30 fps olmak üzere iki konfigürasyonda kodlanmıştır.

B. Test Senaryoları ve Manipülasyon Türleri

Deney senaryoları dört farklı manipülasyon türünü kapsamaktadır: (i) tek kare değişikliği (bir frame'de tek piksel renk değişimi), (ii) ses kanalı üzerinde ince oynama (0,5 dB amplitüd farkı), (iii) zaman damgası kaydırma (10 ms başlangıç gecikmesi) ve (iv) çözünürlük yeniden ölçekleme (1080p'den 720p'ye dönüşüm).

Tablo 2. Test Senaryoları ve Hash Tabanlı Tespit Sonuçları

Senaryo	Manipülasyon Türü	Süre (s)	Hash Uyuşma	Tespit
S1	Tek piksel renk değişimi	30	Uyuşmuyor	✓ Manipüle
S2	Ses amplitüdü değişimi (0,5 dB)	60	Uyuşmuyor	✓ Manipüle
S3	Zaman damgası kaydırma (10 ms)	45	Uyuşmuyor	✓ Manipüle
S4	Çözünürlük yeniden ölçekleme	90	Uyuşmuyor	✓ Manipüle
S5	Manipülasyon yok (orijinal)	30	Uyuştu	✓ Orijinal
S6	Manipülasyon yok (orijinal)	120	Uyuştu	✓ Orijinal



Şekil 2. MD5 Tabanlı Video Doğrulama Sisteminin Algoritmik Akış Diyagramı

SONUÇLAR

Tüm 50 test senaryosunda sistem %100 tespit doğruluğuna ulaşmış; yanlış pozitif veya yanlış negatif vakasına rastlanmamıştır. Bu sonuç, MD5 algoritmasının Çığ Etkisi özelliğinin video doğrulama bağlamındaki yüksek etkinliğini doğrulamaktadır [9].

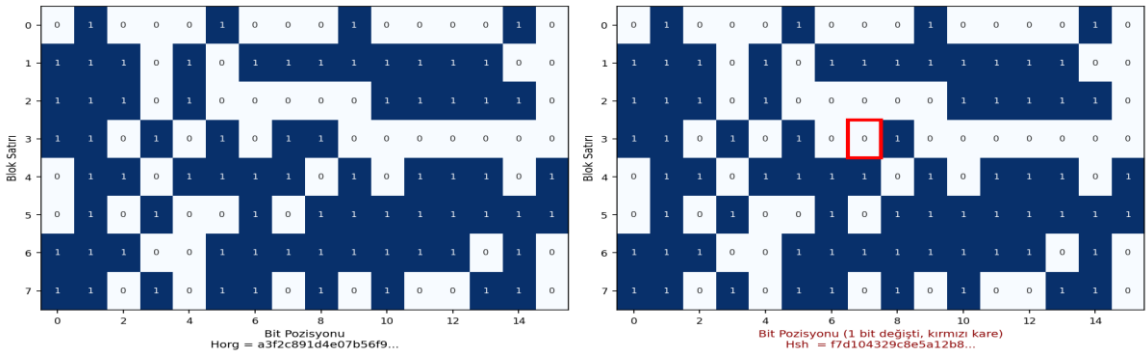
30 saniyelik segment için ortalama doğrulama süresi 1,3 saniye, 120 saniyelik segmentlerde 4,8 saniye olarak ölçülmüş; doğruluk oranı değişmemiştir. Detaylı performans metrikleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Video Segment Uzunluğuna Göre Doğrulama Performans Metrikleri

Süre (s)	Boyut (MB)	FFmpeg (s)	MD5 (s)	Toplam (s)
10	18,4	0,3	0,1	0,4
30	55,2	0,9	0,4	1,3
60	110,5	1,8	0,7	2,5
90	165,8	2,7	1,1	3,8
120	221,0	3,6	1,2	4,8

Tablo 4. Farklı Çözünürlük Kombinasyonlarında MD5 Hash Değişim Oranları

Kaynak	Hedef	Bit Derinliği	Hash Değişim (%)
1080p (1920×1080)	1080p (1920×1080)	8-bit	0,00 (Aynı)
1080p (1920×1080)	720p (1280×720)	8-bit	100,00
1080p (1920×1080)	480p (854×480)	8-bit	100,00
720p (1280×720)	720p (1280×720)	8-bit	0,00 (Aynı)
1080p (1920×1080)	1080p (1920×1080)	10-bit	100,00



Şekil 3. MD5 Çığ Etkisi (Avalanche Effect): Tek Bit Değişiminin Hash Üzerindeki Etkisi

IV. Tartışma

Hash fonksiyonları bit seviyesinde çalıştığı için çözünürlük değişiklikleri hash değerini tamamen farklılaştırmaktadır. Sosyal medya platformlarının otomatik video sıkıştırma mekanizmaları devreye girdiğinde, orijinal içerik bozulmadan iletilmiş olsa bile hash değerleri farklılaşmaktadır [10]. Bu durum sistemi dezenformasyon tespitinde güçlü kılarken aynı zamanda potansiyel bir yanlış alarm kaynağı olarak da değerlendirilebilir.

Bu sınırlamayı aşmak için iki tamamlayıcı yaklaşım önerilmektedir: (i) algısal hashing (pHash, aHash) tekniklerinin entegrasyonu [11, 12] ve (ii) platformdan bağımsız aşamalı doğrulama modeli. Merkezi resmî video arşivinin etkinliği ise arşivleme sürecinin video yayımlandığı andan başlaması ve dijital imza mekanizmalarıyla desteklenmesine doğrudan bağlıdır [6, 13].

V. Çıkarım

Geliştirilen MD5 tabanlı video doğrulama sistemi %100 tespit doğruluğu ve düşük gecikme süresiyle (ortalama 1,3 s) pratik uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Sistemin gerçek dünya koşullarında benimsenmesi için (i) ulusal düzeyde resmî video arşivi kurulması, (ii) sosyal medya entegrasyonu ve (iii) yapay zekâ destekli ön filtreleme katmanlarının eklenmesi gerekmektedir.

Gelecek çalışmalarda çözünürlük değişikliklerine dayanıklı hibrit hash mimarisi (MD5 + pHash), deepfake tespitine yönelik derin öğrenme tabanlı modüller ve gerçek zamanlı sosyal medya tarama arayüzünün prototip düzeyinde hayata geçirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında teknik destek sağlayan ve veri erişimi konusunda katkıda bulunan tüm kurum ve kişilere teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] S. Vosoughi, D. Roy, S. Aral, *"The spread of true and false news online,"* Science, vol. 359, no. 6380, pp. 1146-1151, 2018.
[2] C. Ireton, J. Posetti, *Journalism, 'Fake News' & Disinformation: Handbook for Journalism Education and Training,* UNESCO, Paris, 2018.
[3] R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, A. Morales, J. Ortega-Garcia, *"DeepFakes and beyond: A survey of face manipulation and fake detection,"* Information Fusion, vol. 64, pp. 131-148, 2020.
[4] R. Rivest, *"The MD5 message-digest algorithm,"* IETF RFC 1321, Apr. 1992.
[5] C2PA, *"C2PA Technical Specification v2.2,"* Coalition for Content Provenance and Authenticity, 2024. [Online]. Available: https://spec.c2pa.org
[6] S. Mercan, M. Cebe, R. S. Aygun, K. Akkaya, E. Toussaint, D. Danko, *"Blockchain-based video forensics and integrity verification framework for wireless IoT devices,"* Security and Privacy, vol. 4, no. 2, p. e143, 2021.
[7] E. Casey, *Digital Evidence and Computer Crime: Forensic Science, Computers, and the Internet,* 3rd ed. Academic Press, 2011.
[8] X. Wang, H. Yu, *"How to break MD5 and other hash functions,"* in Proc. EUROCRYPT, Springer, LNCS 3494, pp. 19-35, 2005.
[9] W. Stallings, *Cryptography and Network Security: Principles and Practice,* 4th ed. Pearson Education, 2006.
[10] H. Farid, *"Image forgery detection,"* IEEE Signal Processing Magazine, vol. 26, no. 2, pp. 16-25, 2009.

[11] L. Du, A. T. S. Ho, R. Cong, *"Perceptual hashing for image authentication: A survey,"* Signal Processing: Image Communication, vol. 81, p. 115713, Feb. 2020.
[12] M. K. Mihcak, R. Venkatesan, *"A perceptual audio hashing algorithm: a tool for robust audio identification and information hiding,"* in Proc. 4th Int. Workshop Information Hiding (IH 2001), LNCS 2137, Springer, pp. 51-65, 2001.
[13] A. Malik, M. Kuribayashi, S. M. Abdullahi, A. N. Khan, *"DeepFake detection for human face images and videos: A survey,"* IEEE Access, vol. 10, pp. 18757-18775, 2022.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Kentsel Sorunların Dijital Haritası

Sema Su Yılmaz[a], Senem Adalan[a], Zehra Yardımcı[a], Elif Pınar Hacıbeyoğlu[b]*

[a]Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
[b]Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** 220502016@kocaelisaglik.edu.tr

ÖZET

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi, vatandaşların karşılaştıkları çevresel, altyapısal ve sosyal sorunları konum tabanlı olarak bildirebilecekleri ve yerel yönetimlerin bu bildirileri yapay zeka destekli analizlerle yönetebilecekleri web tabanlı bir platform geliştirmeyi amaçlamaktadır. Günümüzde mevcut bildiri sistemlerinin dağınık yapısı ve geri bildirim süreçlerinin izlenebilir olmaması kent yönetiminde etkin bir iletişim sağlayamamaktadır. Bu durum, vatandaş ile yerel yönetim arasındaki güven ilişkisinin zayıflamasına ve kamu hizmetlerinin verimliliğinin düşmesine yol açabilmektedir. Proje kapsamında sistem mimarisi, Django framework'ü kullanılarak geliştirilmiş ve Google Maps API aracılığıyla harita entegrasyonu sağlanmıştır. Vatandaşlar tarafından iletilen bildiriler ilgili kurumların erişimine sunulmuş, diğer vatandaşların ise bu bildirilere destek ve yorum yapabilmeleri mümkün kılınmıştır. Elde edilen etkileşim verileri ve görsel veriler, Python tabanlı OpenCV ve TensorFlow kütüphaneleri kullanılarak BERT tabanlı metin analizi ve CNN tabanlı görüntü işleme yöntemleriyle analiz edilerek önceliklendirme süreçlerine dahil edilmiştir. Proje ayrıca, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarından 11. hedef olan "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar" kapsamında, 11.3.2 göstergesinde yer alan "düzenli ve demokratik işleyen kentsel planlama ve kent yönetimine, sivil toplumun doğrudan katılım mekanizması bulunan şehirlerin oranı" hedefine katkı sunmaktadır. Sonuç olarak proje, vatandaş katılımını güçlendiren, kent yönetiminde şeffaflığı artıran ve yapay zekanın kamu hizmetlerine entegrasyonunu destekleyen yenilikçi bir dijital yönetim modeli sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Akıllı şehirler, Kentsel yönetişim, Vatandaş katılımı, Yapay zeka.*

Digital Map of Urban Issues

ABSTRACT

The Digital Map of Urban Issues project aims to develop a web-based platform enabling citizens to report location-based environmental, infrastructural, and social issues, while allowing local governments to manage these reports through AI-powered analytics. Currently, fragmented reporting systems and the lack of feedback processes hinder effective communication in urban management. This situation weakens trust between citizens and local authorities and reduces public service efficiency. The system architecture has been developed using the Django framework, with Google Maps API integration. Reports submitted by citizens are made accessible to relevant institutions, while it is made possible for other users to support and comment on these reports. Interaction and visual data are analyzed using Python-based OpenCV and TensorFlow libraries, employing BERT-based text analysis and CNN-based image processing methods, and are incorporated into prioritization processes. Furthermore, the project contributes to United Nations Sustainable Development Goal 11, "Sustainable Cities and Communities." Specifically, it aligns with indicator 11.3.2: "proportion of cities with a direct participation structure of civil society in urban planning and management that operate regularly and democratically." Consequently, the project proposes an innovative digital governance model that enhances civic engagement, increases transparency, and supports the integration of artificial intelligence into public services.

Keywords: *Smart cities, Urban governance, Citizen participation, Artificial intelligence.*

I. GİRİŞ

21. yüzyılda kent yaşamının birçok alanında küreselleşmenin de etkisiyle hızlı değişimler görülmeye başlanmıştır. Dijital çağda bilgi iletişim teknolojilerindeki gelişmeler, kentsel alanlarda farklı yaklaşımların doğmasına neden olmuştur. Bu yaklaşımlar enerji, ulaşım, yapılaşma, iletişim ve üretim gibi çeşitli alanlarda teknolojik gelişmeler kullanılarak insan hayatını kolaylaştırmaya devam etmektedir. Ayrıca sürdürülebilirliğin yön verdiği yeni kentsel planlama anlayışı da kentlerdeki çeşitli problemlerle ilgili planlama ve çözüm arayışları üretmeye çalışmaktadır. Bu bağlamda, akıllı kent anlayışının temel bileşenlerini merkeze alan Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi, kentsel sorunların tespitinden çözümüne kadar olan süreci şeffaf, katılımcı ve teknolojik bir yaklaşımla ele alarak çağdaş kent yönetimi anlayışına katkı sunmayı amaçlamaktadır.

A. Projenin Önemi

Kentsel alanlarda yaşayan vatandaşlar için çevresel, altyapısal ve sosyal sorunlarla karşılaşmak yaygın bir durumdur. Ancak bu sorunların yerel yönetimlere etkin bir şekilde iletilmesi ve çözüm sürecinin şeffaflıkla takip edilmesi kent yönetiminin en büyük zorluklarından biridir. Mevcut bildiri kanallarının dağınık yapısı, iletilen sorunların sonucunu belirsiz kılmakta ve vatandaş-yönetim iletişiminde güven eksikliği yaratmaktadır [1].

Benzer şekilde, Torres-Sandoval ve arkadaşları [2] tarafından yapılan araştırmada, kamu yönetimi ile vatandaşlar arasındaki güven ve şeffaflık eksikliği, belediye hizmetlerine yönelik artan memnuniyetsizliği vurgulamaktadır. Bu durum, halk ile yerel yönetim arasındaki ilişkinin zayıflamasına ve kamu yönetiminde yapısal sorunların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Vatandaşlar, kent yönetimi süreçlerinden dışlandıklarını düşünmekte ve bildirdikleri sorunların sonuçsuz kalacağına dair algı güçlenmektedir.

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'ndan 11. hedef olan "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar" kapsamında, özellikle 11.3.2 göstergesinde yer alan "düzenli ve demokratik işleyen kentsel planlama ve kent yönetimine, sivil toplumun doğrudan katılım mekanizması bulunan şehirlerin oranı" hedefine doğrudan katkı sunmaktadır [3]. Böylece proje yalnızca teknolojik bir yenilik değil aynı zamanda katılımcı kent yönetimi ve sürdürülebilir şehircilik ilkelerini destekleyen toplumsal bir dönüşüm aracı niteliği taşımaktadır.

B. Literatür Araştırması

Akıllı şehir kavramı, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kentsel yaşama entegre edilmesi yoluyla şehirlerin daha yaşanabilir, sürdürülebilir ve katılımcı hale getirilmesini amaçlayan çok boyutlu bir yaklaşımı ifade etmektedir. Literatürde akıllı şehirler sıklıkla insan, yönetişim, ekonomi, hareketlilik, çevre ve yaşam olmak üzere altı temel boyut üzerinden ele alınmaktadır. Bu boyutlara ek olarak yaşam kalitesi, kentsel lojistik, kentsel topluluklarda farkındalık geliştirilmesi ve akıllı şehirlerin değerlendirilmesi gibi unsurların da önemi vurgulanmaktadır [4].

Bu boyutlar arasında akıllı yönetişim, vatandaşlar ile yerel yönetimler arasındaki etkileşimi güçlendiren ve işbirliğini teşvik eden temel bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Avrupa Komisyonu (2020), akıllı şehirlerde karşılaşılan temel zorluğun yalnızca dijitalleşme olmadığını, aynı zamanda kamu otoriteleri ile vatandaşlar arasında güven ve şeffaf ilişkilerin inşa edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler tarafından yayımlanan "International Guidelines on People-Centred Smart Cities" belgesinde de açıkça görülmektedir [5]. 2025 yılında yayımlanan belgede akıllı şehirlerin gelişiminde toplumsal katılım, şeffaf iletişim ve kapsayıcı karar alma süreçleri temel ilkeler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, akıllı şehirlerde sosyal katılım yalnızca kararların kalitesini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda vatandaşlar ile yerel yönetimler arasındaki güven ilişkisini güçlendirerek sürdürülebilir kentsel gelişime katkı sağlamaktadır [6].

Literatürde, vatandaş katılımının akıllı şehirlerin başarısı açısından kritik bir unsur olduğu vurgulanmaktadır. Şeffaf ve süreklilik arz eden iletişim politikaları benimseyen yerel yönetimlerde, yurttaş katılım düzeylerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Yenilikçi şehirlerin, katılımcı yönetişim uygulamalarını daha yaygın biçimde hayata geçirdiği ve bu uygulamaların toplumsal bütünleşmeyi güçlendirdiği belirtilmektedir [7]. Zabrze kentinde gerçekleştirilen bir araştırma, vatandaşların akıllı şehir çözümlerine yönelik algılarının yerel yönetimlerin iletişim etkinliği ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur [8]. Benzer şekilde Ismagilov ve arkadaşları [9], akıllı şehir hizmetlerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kamu güveninin güçlendirilmesi gerektiğini, bunun da açık iletişim kanalları ve etkileşimli katılım platformları aracılığıyla sağlanabileceğini ifade etmektedir.

Bu kapsamda geliştirilen Kentsel Sorunların Dijital Haritası, literatürde belirtilen sınırlılıkları dikkate alarak kullanıcı dostu bir arayüz, minimum harita düzenleme gereksinimi ve veri doğruluğunu destekleyen kontrol mekanizmaları ile tasarlanmıştır. Literatürde bu alana yönelik geliştirilen benzer çalışmalardan biri de Consoli ve arkadaşları [10] tarafından İtalya'nın Catania Belediyesi için geliştirilen platformdur.

2015 yılında geliştirilen bu çalışma, vatandaş katılımını ve belediye bakım süreçlerini entegre eden web tabanlı bir platform sunmaktadır. Mevcut sistemlerin aksine sadece sorunu raporlamayla kalmayıp yaşam döngüsünün tamamını tek bir platformda yönetmektedir. Sistem, vatandaşların etkileşime geçtiği "Ön Ofis" ve belediye personelinin yönettiği "Arka Ofis" olmak üzere iki ana modül üzerinden işlemektedir. Vatandaşlar, tespit ettikleri sorunları sisteme girerken adres bilgisi sağlamakta ve soruna dair notlar ile görsel ekleyebilmektedir. Sistemin önemli bir özelliği aynı sorun için farklı zamanlarda gelen birden fazla bildirinin birbirine bağlanarak tek bir hata ögesi olarak kaydedilmesidir. Bakım işlemi tamamlandığında veya gerçekleştirilemediğinde süreç kapatılmakta ve durum değişikliği anlık olarak vatandaşın ekranına yansıtılmaktadır.

Bununla birlikte araştırma çeşitli sınırlılıklar içermektedir,

- Manuel Doğrulama İhtiyacı: Sistemin güvenliği ve veri kalitesi, otomatik bir yapay zeka denetimi yerine, belediye personelinin manuel doğrulama sürecine bağımlıdır. Bu adım spam ve kötüye kullanımı engellemek için zorunlu tutulmuştur.
- Kullanıcı Bağımlılığı: Sorunun doğru departmana hızlı yönlendirilmesi vatandaşın sorun türünü doğru seçmesine bağlıdır.
- Prototip Aşaması: Çalışma, uzun vadeli performans testlerinden ziyade bir prototip uygulaması olarak sunulmuş olup geniş ölçekli kullanımda oluşabilecek sorunlara dair veriler sınırlıdır.

Sonuç olarak, Consoli ve arkadaşları tarafından önerilen bu platform kentsel bakım süreçlerinin uçtan uca yönetimi ve veri entegrasyonu açısından literatürde önemli bir temel oluşturmaktadır. Ancak çalışmada vurgulanan insan odaklı doğrulama zorunluluğu ve manuel sınıflandırma kısıtları süreç verimliliğini sınırlayan temel faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, Kentsel Sorunların Dijital Haritası için hedeflenen yapay zeka destekli önceliklendirme tekniklerinin, söz konusu kısıtları aşmak ve sistem ölçeklenebilirliğini artırmak adına ne denli bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

II. MATERYAL METOT

A. Kullanılan Yazılım ve Teknolojiler

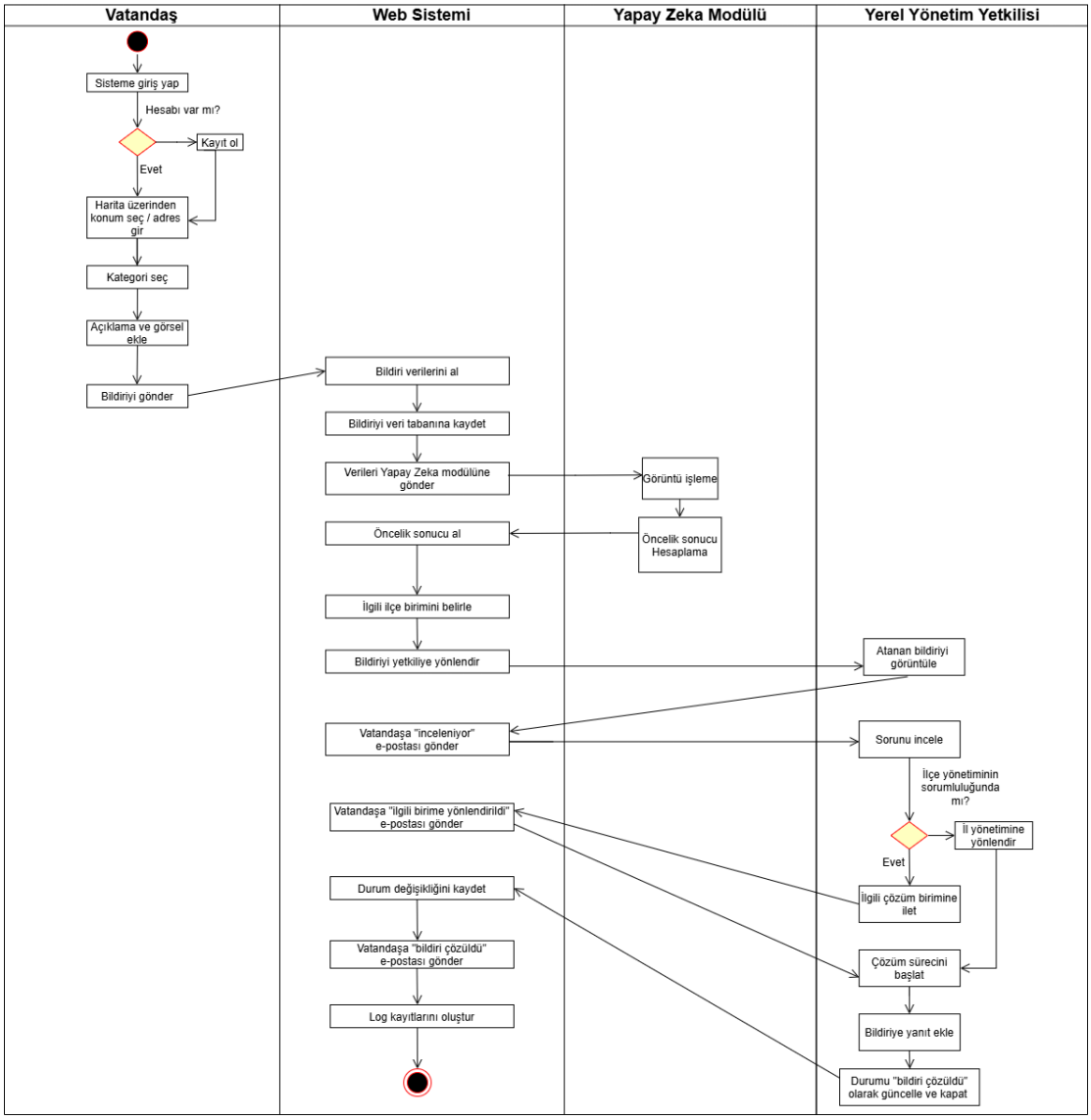
Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesinde, sistemin işlevsel gereksinimlerini karşılayabilecek, ölçeklenebilir, güvenli ve sürdürülebilir bir yazılım altyapısı oluşturulmuştur. Bu doğrultuda projenin sunucu tarafında Python tabanlı Django Framework kullanılmıştır. Django'nun Model-View-Template (MVT) mimarisi hızlı geliştirme süreçlerini desteklemesi, güçlü güvenlik katmanları sunması ve modüler yapıya uygun esnek bir altyapı sağlaması tercih edilmesinde etkili olmuştur. İstemci tarafında ise HTML, CSS ve JavaScript teknolojilerinden yararlanılmış, kullanıcı arayüzünün mobil uyumlu ve etkileşimli bir yapıda geliştirilebilmesi amacıyla Tailwind CSS ve Bootstrap kütüphaneleri kullanılmıştır. Böylece kullanıcı deneyimini ön planda tutan sade ve erişilebilir bir arayüz tasarımı oluşturulmuştur.

Sisteme iletilen bildirilerin analiz edilerek önceliklendirilmesi amacıyla yapay zeka destekli yöntemlerden yararlanılmıştır. Metin analizlerinde kullanıcı ifadelerinin anlam ilişkilerini değerlendirebilmek için BERT tabanlı model, görüntü analizlerinde ise görsel ipuçlarını incelemek amacıyla CNN tabanlı model kullanılmıştır. Bu süreçte algoritma geliştirme için TensorFlow, görsellerin işlenmesi ve modele uygun hale getirilmesi için OpenCV teknolojilerinden yararlanılmıştır. Veri tabanı yönetim sistemi olarak ise açık kaynak kodlu yapısı, güvenilirliği ve gelişmiş veri türü desteği nedeniyle PostgreSQL tercih edilmiştir. Özellikle rol tabanlı yönetim işlemlerine uygun yapısı proje kapsamında önemli avantaj sağlamıştır. Konum bazlı bildirilerin gerçekleştirilmesi amacıyla Google Maps API kullanılarak Kocaeli ili haritası sisteme entegre edilmiş, hassas konum işaretleme ve harita üzeri veri görselleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Proje geliştirme sürecinde Visual Studio Code geliştirme ortamı kullanılmış, ayrıca sürüm kontrolü ve ekip içi koordinasyonun sağlanması amacıyla GitHub platformundan yararlanılmıştır.

B. Veri Tabanı Yapısı

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi kapsamında, vatandaşlar tarafından bildirilen kentsel sorunlara ait çok sayıda veri üretilmekte ve işlenmektedir. Bu veriler bildiriye ait konum bilgisi, kategori, açıklama, görseller ve durum güncellemeleri gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Bildiri verilerinin kayıt altına alınması, yönetilmesi ve yetkili kullanıcılar tarafından görüntülenebilmesi sistemin temel gereksinimleri arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, bildirilere ilişkin işlemlerin kullanıcı yetkilendirmelerine uygun olarak yürütülmesi gerekmektedir. Söz konusu gereksinimin karşılanabilmesi için verilerin ilişkisel bir veri tabanı yapısı içerisinde saklanması zorunlu hale gelmiştir.

C. Sistem Akışı



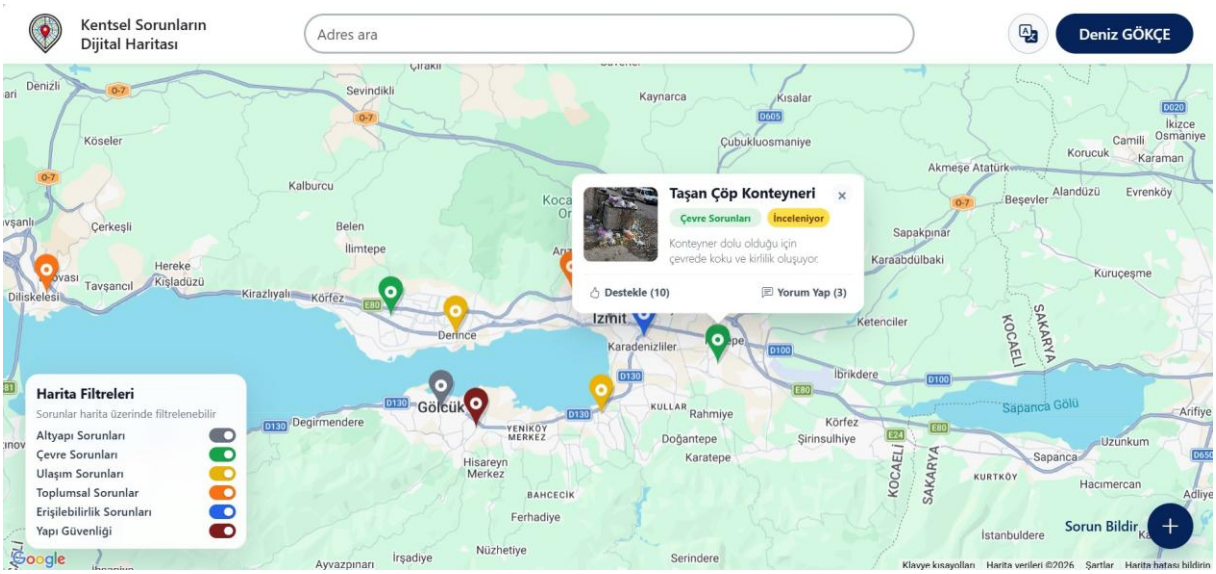
Şekil 1. KSDH aktivite diyagramı

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesinde, bir bildirinin oluşturulmasından çözüm sürecinin tamamlanmasına kadar geçen iş akışı birden fazla aktör ve sistem bileşeni tarafından yürütülmektedir. Bu süreç Şekil. 1'deki aktivite diyagramında da görüldüğü üzere vatandaş, web sistemi, yapay zeka modülü ve yerel yönetim yetkilisi arasında gerçekleşen etkileşimleri içermektedir.

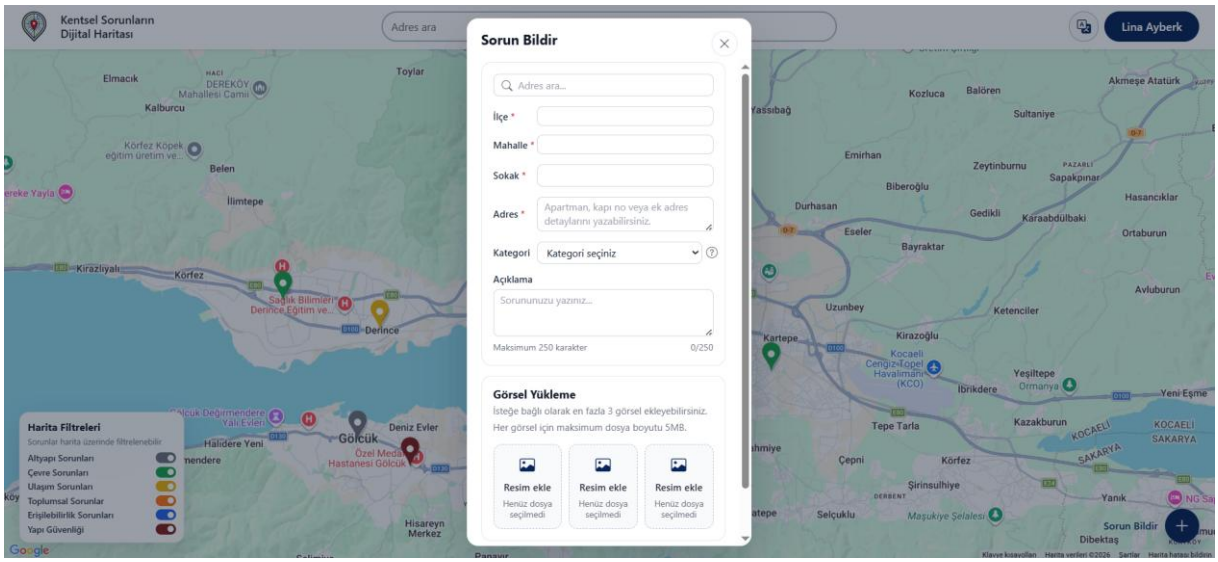
D. Sistem Tasarımı

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesine ait arayüz tasarımları yapılırken kullanıcı deneyimleri baz alınmıştır. Bu doğrultuda proje isterlerine uygun biçimde sistemde yer alan vatandaş, yönetim yetkilisi ve sistem yetkilileri için arayüz tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Vatandaş rolüne sahip kullanıcılar KSDH platformuna erişim sağladıklarında Şekil. 2'de yer alan arayüz ile karşılaşmaktadır. Bu arayüzden kullanıcılar, Kocaeli ilinde bildirilen kentsel sorunları harita üzerinde görüntüleyebilmekte ve kategori bazlı olarak filtreleme yapabilmektedir. Sisteme giriş yapan kullanıcılar, Şekil. 3'de görüldüğü üzere "Sorun Bildir" butonu aracılığıyla yeni bildiri oluşturabilmektedir. Profil alanından daha önce oluşturdukları bildirilerin durumlarını takip edebilmekte ve profil bilgilerini güncelleyebilmektedir. Ayrıca kullanıcılar, sistem arayüzü üzerinden Türkçe ve İngilizce dil seçenekleri arasında tercih yapabilmektedir. Bu yapı sayesinde kullanıcıların kentsel sorunları hızlı, anlaşılır ve etkileşimli biçimde sisteme iletebilmesi amaçlanmıştır.

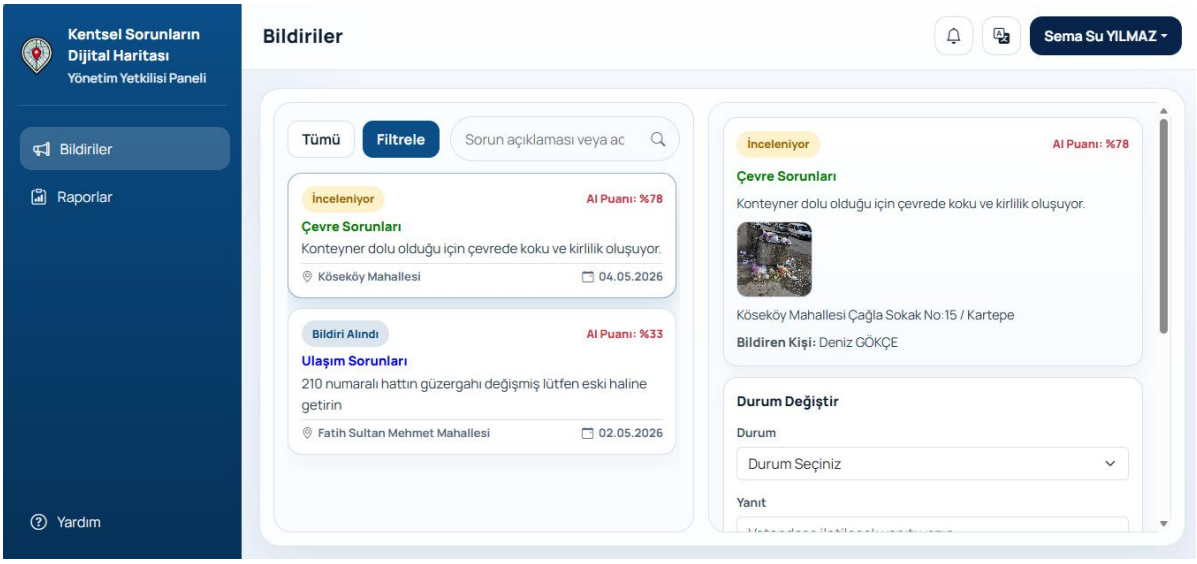


Şekil. 2 KSDH ana sayfa arayüzü



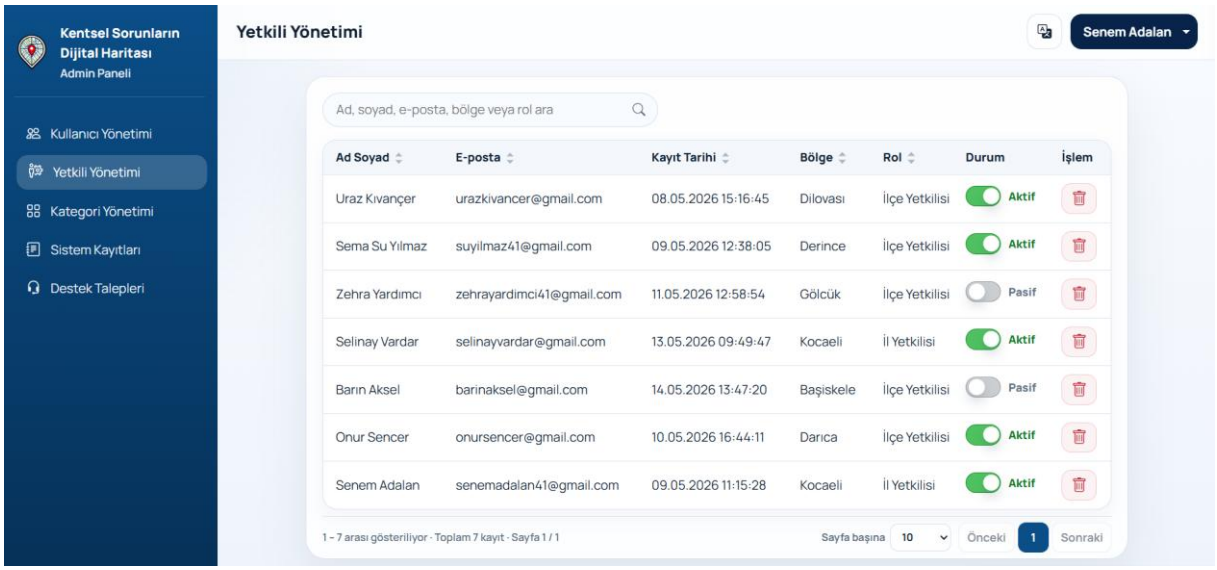
Şekil 3. KSDH sorun bildirme ekranı

Yönetim yetkilileri, kendilerine tanımlı yetkiler doğrultusunda KSDH yönetim paneli üzerinden sistem işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Şekil. 4'de bulunan "Bildiriler" sekmesi aracılığıyla sistemde yer alan tüm bildiriler görüntülenebilmekte, kategori, tarih ve konum bazlı olarak filtrelenebilmektedir. Yetkililer seçilen bildiriye ait detaylı bilgileri inceleyebilir, bildiri durumlarını güncelleyebilir ve yapay zeka tabanlı önceliklendirme özelliğini aktif veya pasif hale getirebilmektedir. Panelde yer alan "Raporlar" sekmesi aracılığıyla ise tamamlanmış bildirilere ilişkin raporlara erişebilmektedir.

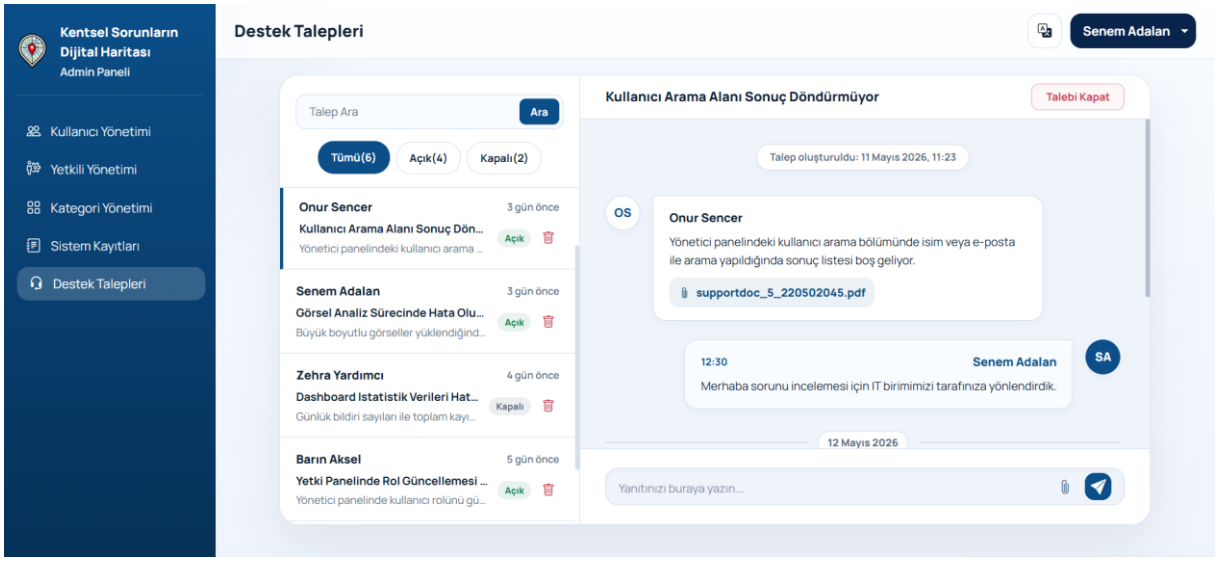


Şekil 4. KSDH yönetim yetkilisi bildiriler sekmesi

Sistem yetkilileri, kendilerine tanımlı yetkiler doğrultusunda KSDH admin paneli üzerinden yönetim işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Şekil. 5'de bu yönetim işlevlerinden biri olan "Yetkili Yönetimi" sekmesi gösterilmektedir. Bu arayüz sayesinde sistem yetkilileri, KSDH bünyesinde yer alan yetkililerin bilgilerini görüntüleyebilmekte, gerekli görülen durumlarda kullanıcı hesaplarını pasif hale getirebilmekte ve yetkili kayıtlarını sistemden kaldırabilmektedir. Ayrıca Şekil. 6'da gösterilen "Destek Talepleri" sekmesi aracılığıyla yönetim yetkilileri tarafından iletilen sorunlar, sistem yetkilileri tarafından görüntülenebilmekte ve bu talepler üzerinden doğrudan iletişim sağlanabilmektedir.



Şekil 5. KSDH sistem yetkilisi yetkili yönetimi sekmesi



Şekil 6. KSDH sistem yetkilisi destek talepleri sekmesi

III. SONUÇLAR

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi kapsamında geliştirilen sistem ile vatandaşların çevresel, altyapısal ve sosyal sorunları harita tabanlı olarak sisteme bildirebildiği, ilgili kurumların ise bu bildirileri yönetebildiği web tabanlı bir platform oluşturulmuştur. Sistem içerisinde vatandaşların konum bilgisi, açıklama ve görsel içeren bildiriler oluşturabilmesi sağlanmış, bildiri durumlarının takip edilebildiği etkileşimli bir yapı geliştirilmiştir.

Bu bağlamda sistem, kent yönetiminde sorunların daha doğru tespit edilmesine ve ilgili birimlere daha hızlı yönlendirilmesine yardımcı olmuştur. Bildirilerin yapay zeka destekli analizlerle önceliklendirilmesi, müdahale süreçlerinin daha verimli yönetilmesini desteklemiş ve kamu hizmetlerinin etkin kullanımına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi, vatandaşların bildiri durumlarını takip edebilmesine ve diğer kullanıcılarla etkileşim kurabilmesine olanak tanıyarak süreç şeffaflığını artırmış ve vatandaş–yönetim iletişimini güçlendirmiştir. Ayrıca yapay zekanın kamu hizmetlerine entegrasyonunu teşvik eden yenilikçi bir dijital yönetim modeli ortaya koymuştur.

IV. TARTIŞMA

Literatürde yer alan mevcut kentsel bildiri sistemleri incelendiğinde birçok uygulamanın yalnızca sorun bildirisi oluşturmaya odaklandığı, süreç takibi, önceliklendirme ve kullanıcı geri bildirimi konularında sınırlı kaldığı görülmektedir. Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesi ise bu sınırlılıkları azaltabilmek amacıyla yapay zeka destekli analiz mekanizmalarını sisteme entegre ederek daha verimli bir yönetim modeli sunmuştur.

Kentsel Sorunların Dijital Haritası projesinin bir diğer önemli yönü, vatandaş katılımını artırmaya yönelik etkileşimli bir yapı sunmasıdır. Kullanıcıların bildirilere destek verebilmesi, yorum yapabilmesi ve süreç durumlarını takip edebilmesi, vatandaş ile yerel yönetimler arasındaki iletişimin daha şeffaf hale gelmesine katkıda bulunmuştur. Bu yaklaşım, literatürde vurgulanan katılımcı yönetişim ve akıllı şehir anlayışı ile uyumlu bir yapı ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte sistemin daha geniş ölçekli kullanım senaryolarında test edilmesi, farklı şehir altyapılarına uyarlanması ve gerçek zamanlı veri kaynaklarıyla desteklenmesi gelecekteki geliştirme alanları arasında değerlendirilmektedir. Özellikle MOBESE gibi kamera sistemleriyle entegrasyon sağlanması ve daha büyük veri setleriyle yapay zeka modellerinin eğitilmesi sistemin doğruluk ve karar destek kapasitesini artırabilecek önemli adımlar olarak görülmektedir. Ayrıca platformun mobil uygulama olarak geliştirilmesi, kullanıcı erişilebilirliğini artırarak sistemin daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayabilecek diğer bir önemli geliştirme alanı olarak değerlendirilmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada, vatandaşların kentsel sorunları konum tabanlı olarak bildirebildiği ve yerel yönetimlerin bu bildirileri yapay zeka destekli analizlerle yönetebildiği Kentsel Sorunların Dijital Haritası platformu geliştirilmiştir. Kocaeli ili özelinde geliştirilen sistem, sorunların daha doğru tespit edilmesine, müdahale süreçlerinin hızlandırılmasına ve kamu hizmetlerinin daha verimli yönetilmesine katkı sağlayan bütünleşik bir yapı sunmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu proje, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Yazılım Mühendisliği bölümü lisans bitirme çalışması kapsamında oluşturulmuş olup proje süresince desteğini esirgemeyen danışman hocamız Dr. Öğr. Üyesi Elif Pınar HACIBEYOĞLU'na en içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] B. Shin, J. Floch, M. Rask, P. Bæck, C. Edgar, A. Berditchevskaia, P. Mesure, and M. Branlat, "A Systematic Analysis of Digital Tools for Citizen Participation," *Government Information Quarterly*, 41(3), 2024. https://doi.org/10.1016/j.giq.2024.101954

[2] A. J. Torres-Sandoval, M. E. Tavera-Cortés, M. A. Acevedo-Ortiz, and Y. D. Ortiz-Hernández, "Transparency, Governance, and Public Service Management: Challenges of Citizen Participation in Ecatepec de Morelos," *Administrative Sciences,* 15(4), 144, 2025. https://doi.org/10.3390/admsci15040144

[3] Sürdürülebilir Kalkınma İçin Küresel Amaçlar, "11 Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar". [Online]. Available: https://www.kureselamaclar.org/amaclar/surdurulebilir-sehirler-ve-topluluklar/ [Accessed: Jan. 11, 2026].

[4] L. Anthopoulos, M. Janssen, and V. Weerakkody, "A Unified Smart City Model (USCM) for Smart City Conceptualization and Benchmarking," *International Journal of Electronic Government Research,* 12(2), 77-93, 2016. https://doi.org/10.4018/IJEGR.2016040105

[5] UN-Habitat, "International Guidelines on People-Centred Smart Cities." [Online]. Available: https://unhabitat.org/sites/default/files/2025/03/international_guidelines_on_people_centred_smart_cities_clean_4.3.2025.pdf [Accessed: Jan. 13, 2026].

[6] A. Smalec, "Smart Cities, Smart Governance: The Role of Communication and Social Participation in Building Cities of the Future," *Scientific Papers of Silesian University of Technology, Organization and Management Series,* 227, 355-365, 2025. http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2025.227.27

[7] M. E. Cortés-Cediel, I. Cantador, and M. P. R. Bolívar, "Analyzing Citizen Participation and Engagement in European Smart Cities," *Social Science Computer Review,* 39(4), 592-626, 2021. https://doi.org/10.1177/0894439319877478

[8] M. Mańka-Szulik, D. Krawczyk, and K. Wodarski, "Residents' Perceptions of Challenges Related to Implementation of Smart City Solutions by Local Government," *Sustainability,* 15(11), 8532, 2023. https://doi.org/10.3390/

[9] E. Ismagilova, L. Hughes, Y. K. Dwivedi, and K. Raman, "Smart cities: Advances in research—An information systems perspective," *International Journal of Information Management,* 47, 88-100, 2019. https://ideas.repec.org/a/eee/ininma/v47y2019icp88-100.html

[10] S. Consoli, D. R. Recupero, M. Mongiovi, V. Presutti, G. Cataldi, and W. Patatu, "An Urban Fault Reporting and Management Platform for Smart Cities," in *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web (WWW '15 Companion),* Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 535–540, 2015. https://doi.org/10.1145/2740908.2743910

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

EEG Tabanli Zihinsel Aritmetik Gorevi Sirasinda Beyin Aktivitesinin Spektral Analizi

Eralp Bahçıvan[a], Kemal Polat[b], Ümit Şentürk[c], Şule Aydın Türkoğlu[d]*

[a]Faculty of Education, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, Türkiye
[b]Department of Electrical and Electronics Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, 14280, Bolu, Turkey
[c] Department of Computer Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, Turkey
[d]Department of Neurology, Bolu Abant İzzet Baysal University, Bolu, Türkiye
*** Corresponding Author:** eralpbahcivan@ibu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, zihinsel aritmetik görevi sırasında kaydedilen elektroensefalografik (EEG) sinyallerinin spektral özelliklerini analiz ediyoruz. Otuz altı sağlıklı katılımcı (27 kadın, 9 erkek; ortalama yaş 18,2 ± 2,1 yıl) iki koşulda EEG kaydına tabi tutuldu: dinlenme halindeki temel durum ve seri çıkarma görevi. Delta (1-4 Hz), teta (4-8 Hz), alfa (8-13 Hz) ve beta (13-30 Hz) bantlarındaki değişiklikleri ölçmek için güç spektral yoğunluğu tahminini kullandık. Alfa bandı, dinlenme durumuna göre aritmetik koşulu sırasında güçte %33,7'lik bir düşüşle en büyük etkiyi gösterdi. Ayrıca katılımcıları çıkarma doğruluğuna göre iyi ve kötü performans gösteren gruplara ayırdık. Kötü performans gösterenler, iyi performans gösterenlere (%30,1) göre daha fazla alfa baskılanması (%43,0) sergiledi ve teta bandında da benzer bir örüntü gözlendi (%17,7'ye karşı %10,1 azalma). Bu grup düzeyindeki farklılıklar, EEG tabanlı iş yükü izleme ve nörofeedback uygulamaları açısından önem taşıyabilir.

Anahtar Kelimeler: *Alfa baskılanması, EEG, Güç spektral yoğunluğu, Zihinsel aritmetik, Zihinsel iş yükü.*

Spectral Analysis of Brain Activity During EEG-Based Mental Arithmetic Task

Eralp Bahçıvan[a], Kemal Polat[b], Ümit Şentürk[c], Şule Aydın Türkoğlu[d]*

[a]Faculty of Education, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, Türkiye
[b]Department of Electrical and Electronics Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, 14280, Bolu, Turkey
[c] Department of Computer Engineering, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, Turkey
[d]Department of Neurology, Bolu Abant İzzet Baysal University, Bolu, Türkiye
*** Corresponding Author:** eralpbahcivan@ibu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, we analyze the spectral characteristics of electroencephalographic (EEG) signals recorded during a mental arithmetic task. Thirty-six healthy participants (27 women, 9 men; mean age 18.2 ± 2.1 years) underwent EEG recording under two conditions: baseline resting state and a serial subtraction task. We used power spectral density estimation to measure changes in the delta (1–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha (8–13 Hz), and beta (13–30 Hz) bands. The alpha band showed the greatest effect, with a 33.7% decrease in power during the arithmetic condition compared to the resting state. We also divided participants into good- and poor-performing groups based on subtraction accuracy. Poor performers showed greater alpha suppression (43.0%) than good performers (30.1%), and a similar pattern was observed in the theta band (17.7% vs. 10.1%). These group-level differences may be important for EEG-based workload monitoring and neurofeedback applications.

Keywords: *Alpha suppression, EEG, Mental arithmetic, Mental workload, Power spectral density.*

I. INTRODUCTİON

EEG is one of the most widely used methods for recording brain activity, mainly because it is non-invasive, relatively cheap, and offers millisecond-level temporal resolution [1]. Over the past few decades, researchers have applied EEG to study various cognitive processes such as attention, memory encoding, and

arithmetic reasoning [2]. A common observation across these studies is that when a person transitions from a relaxed state to an active mental task, the EEG frequency content changes in predictable ways.

The alpha rhythm (8-13 Hz) is perhaps the best-known example. Under resting conditions with eyes open, alpha activity is typically prominent over posterior scalp regions. Once the person begins a cognitive task, alpha power decreases, a phenomenon known as event-related desynchronization (ERD) [3]. The degree of alpha suppression is generally taken as an index of the extent to which cortical resources are devoted to the task [4]. Theta oscillations (4-8 Hz) are also relevant here; frontal theta power tends to increase with increasing working memory demands [5].

Serial subtraction is a classic experimental paradigm for inducing mental workload [6]. In this type of task, a subject is given a starting number and must repeatedly subtract a fixed amount, keeping track of intermediate results in working memory. This engages both sustained attention and executive function simultaneously. Earlier work has shown that the amount of alpha suppression during arithmetic can vary widely across individuals, and there is some evidence that it correlates with performance [7].

However, the relationship between these spectral changes and actual task performance has not been studied in enough detail, especially when comparing distinct performance groups. In this work, we recorded multi-channel EEG from 36 participants during rest and during a serial subtraction task. Our main objective was to compare spectral power changes between participants who performed well on the arithmetic and those who did not, to assess whether EEG signatures differ systematically between these groups.

II. Materİal and Method

A. Participants

We recruited 36 healthy volunteers (27 female, 9 male) aged 16-26 years (mean 18.2, SD 2.1). All of them had normal or corrected-to-normal vision and no history of neurological or psychiatric disorders. People who were taking psychoactive medication or who had a history of substance abuse were excluded. After the experiment, the participants were split into two groups based on their arithmetic performance: Group G (n=24, good performers) completed an average of 21 subtractions in four minutes (SD = 7.4), while Group B (n=12, poor performers) managed only about 7 subtractions on average (SD = 3.6).

B. EEG Recording

We used a Neurocom 23-channel EEG system (XAI-MEDICA, Ukraine) with Ag/AgCl electrodes arranged according to the 10-20 international placement scheme. The reference was a linked-ears montage. During recording, a 30 Hz low-pass filter and a 50 Hz notch filter were applied to suppress high-frequency noise and power line interference, respectively. The data were sampled at 500 Hz. Each participant went through two recording sessions back to back: first, a 60-second resting baseline with eyes open, and then a 60-second recording while they performed the arithmetic task.

C. Experimental Protocol

For the arithmetic condition, participants were asked to do serial subtraction. The experimenter read out a four-digit number (the minuend) and a two-digit number (the subtrahend) at the start of each trial, for instance 3141 and 42. The participant then had to repeatedly subtract the smaller number from the larger one, doing all calculations in their head. We recorded how many correct subtractions each person completed within a four-minute period.

D. Signal Processing and Analysis

Before analysis, the raw EEG data were cleaned using Independent Component Analysis (ICA) to remove eye blinks, muscle activity, and cardiac artifacts. After ICA, we selected 60-second artifact-free segments from each recording. Power spectral density was then estimated using Welch's method with 2-second Hanning windows and 50% overlap. From the resulting spectra, we calculated the total power in four frequency bands: delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-13 Hz), and beta (13-30 Hz). For each participant, the band powers were averaged across all 19 EEG channels (excluding the ear reference and ECG channels). We quantified the task-related change as a percentage: ((P_task - P_rest) / P_rest) x 100.

III. Results

A. Overall Spectral Changes

Figure 1 shows example EEG traces from one participant during rest and during the arithmetic task. Even by visual inspection, there is a clear reduction in the rhythmic (alpha-range) oscillations in the task condition compared to rest.

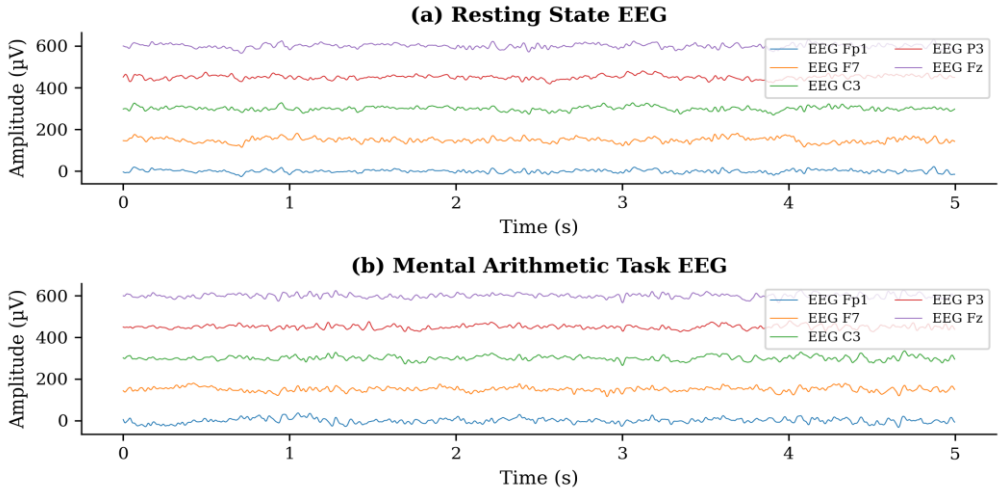


Figure 1. Example raw EEG traces during (a) resting state and (b) mental arithmetic task.

The group-averaged power spectra and band power values are presented in Figure 2 and Table 1. The biggest change was in the alpha band, which dropped by 33.7% during the task. Theta power decreased by 12.3%, and beta by 12.8%. Delta was the only band that showed an increase (+10.4%). These trends were fairly consistent across participants, though individual variability was considerable, as reflected in the standard deviations in Table 1.

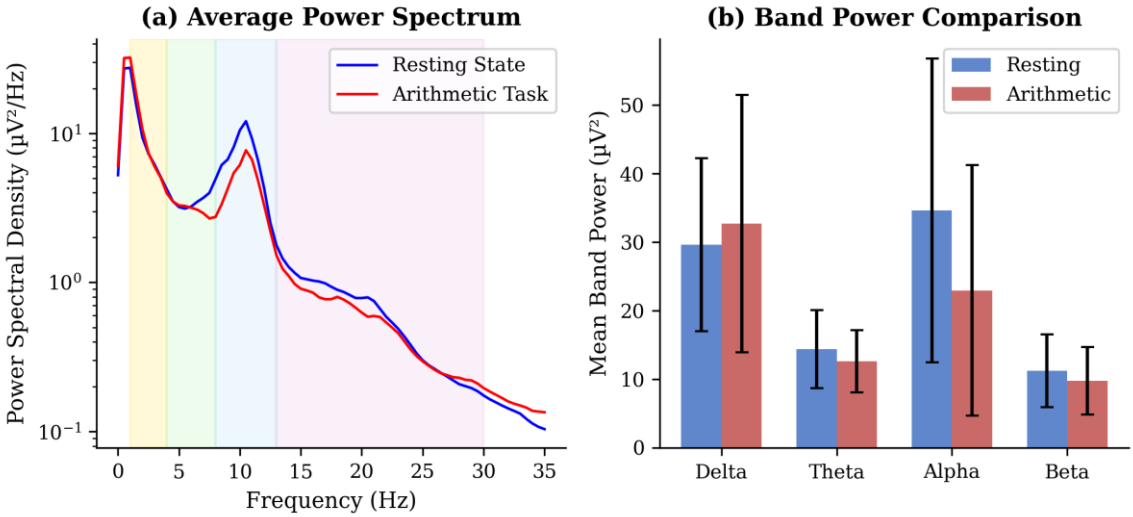


Figure 2. (a) Averaged power spectral density for resting and arithmetic conditions. (b) Mean band power comparison across frequency bands.

Table 1. Mean band power values and percentage change from rest to task.

Frequency Band	Rest (uV^2)	Task (uV^2)	Change (%)
Delta (1-4 Hz)	29.62 +/- 12.65	32.70 +/- 18.79	+10.4
Theta (4-8 Hz)	14.39 +/- 5.69	12.62 +/- 4.57	-12.3
Alpha (8-13 Hz)	34.64 +/- 22.16	22.95 +/- 18.30	-33.7
Beta (13-30 Hz)	11.20 +/- 5.32	9.76 +/- 4.96	-12.8

B. Comparison Between Performance Groups

Figure 3 breaks down the band power data by performance group. Both groups showed alpha suppression, but the effect was stronger in the poor performers. Group B had a 43.0% drop in alpha power, compared to 30.1% in Group G. A similar pattern held for theta: poor performers showed a 17.7% decrease, compared to 10.1% for the good performers. The delta and beta band changes were more similar across groups.

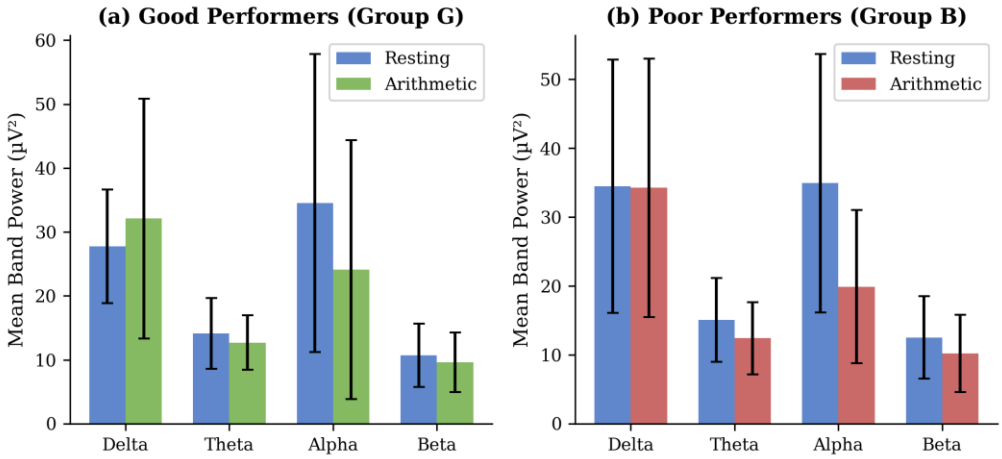


Figure 3. Band power comparison for (a) good performers (Group G) and (b) poor performers (Group B).

C. Channel-Wise Alpha Suppression

We also examined alpha suppression on a channel-by-channel basis (Figure 4). The suppression was present at almost every electrode location, but it was strongest over the posterior sites (O1, O2, P3, P4). The frontal electrodes showed a reduction too, though somewhat smaller in magnitude. This suggests that the arithmetic task engaged cortical areas beyond just the parieto-occipital regions.

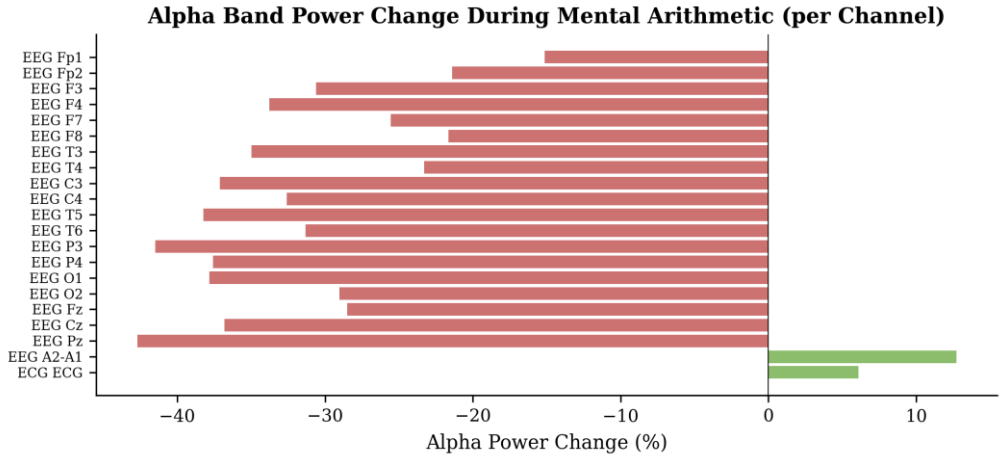


Figure 4. Percentage change in alpha band power for each EEG channel during mental arithmetic.

IV. Discussion

The alpha suppression we observed (33.7%) is consistent with previous reports for mental arithmetic and similar cognitive tasks [3, 4]. The fact that the suppression showed up across both frontal and posterior electrodes is not too surprising, given that serial subtraction requires sustained attention (frontal areas), numerical processing (parietal areas), and working memory maintenance, all at once.

What is more interesting is the group difference. One might initially expect that good performers would show more alpha suppression, since they are presumably more engaged with the task. But we found the opposite: poor performers had a 43.0% drop in alpha, while good performers showed only a 30.1% drop. This pattern aligns with the neural efficiency hypothesis proposed by Neubauer and Fink [8], which posits that people who are better at a cognitive task tend to use fewer neural resources to perform it. In other words, the good performers may have been solving the problems with more efficient cortical processing, so they did not need as much widespread desynchronization.

The theta results point in a similar direction. Poor performers showed a greater decrease in theta (17.7% vs. 10.1%), which could reflect their greater struggle with the working memory component of the task. Frontal theta has been consistently linked to working memory load in prior work [5, 9], and a greater drop in theta might indicate that poor performers were more often reaching the limits of their working memory capacity.

The small increase in delta power (+10.4%) during the task is also worth mentioning. Increases in delta during cognitive tasks have been reported before and are sometimes attributed to inhibitory processes, in which the brain suppresses irrelevant background activity to help the person concentrate [10]. We did not analyze delta changes by group, but this could be an interesting direction for follow-up work.

There are several limitations we should acknowledge. The sample was not balanced with respect to gender (27 female vs. 9 male) or group size (24 good vs. 12 poor performers), which limits the generalizability of the group comparisons. We also did not perform any statistical significance testing (e.g., t-tests or ANOVAs) on the group differences, so the reported percentage differences should be interpreted with some caution. Future studies with larger and more balanced samples, combined with time-frequency or connectivity analyses, would help clarify these patterns.

V. Conclusion

We analyzed multi-channel EEG recordings from 36 participants during rest and mental arithmetic. Three main results emerged. First, alpha power dropped by about 34% during the task, confirming that alpha suppression is a robust marker of cognitive engagement in arithmetic. Second, poor performers exhibited greater alpha (and theta) suppression than good performers, which aligns with the neural efficiency account. Third, the alpha effect was widespread across the scalp, with the strongest suppression at posterior electrode sites.

From a practical standpoint, these spectral differences between performance groups could be useful for building EEG-based systems that not only detect whether someone is mentally loaded but also estimate how effectively they are handling the task. Real-time classification of these spectral features is a natural next step for future work.

Acknowledgement

The authors thank all participants who took part in this experiment. The EEG dataset used here was originally collected and shared by Zyma et al. and is available through PhysioNet [11].

References

[1] S. Sanei and J.A. Chambers, "EEG Signal Processing," John Wiley and Sons, 2007.
[2] R. Palaniappan, "Electroencephalogram signals from imagined activities of mind for BCI," in Proc. 2nd International Conference on Biomedical Engineering, Innsbruck, Austria, 2005, pp. 246-249.
[3] W. Klimesch, "Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information," Trends in Cognitive Sciences, vol. 16, no. 12, pp. 606-617, 2012.
[4] G. Pfurtscheller and F.H. Lopes da Silva, "Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles," Clinical Neurophysiology, vol. 110, no. 11, pp. 1842-1857, 1999.
[5] O. Jensen and C.D. Tesche, "Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task," European Journal of Neuroscience, vol. 15, no. 8, pp. 1395-1399, 2002.
[6] I. Zyma, S. Tukaev, I. Seleznov et al., "Electroencephalograms during mental arithmetic task performance," Data, vol. 4, no. 1, p. 14, 2019.
[7] M. Doppelmayr, W. Klimesch, K. Hodlmoser, P. Sauseng, and W. Gruber, "Intelligence related upper alpha desynchronization in a semantic memory task," Brain Research Bulletin, vol. 66, no. 2, pp. 171-177, 2005.
[8] A. C. Neubauer and A. Fink, "Intelligence and neural efficiency," Neuroscience and Biobehavioral Reviews, vol. 33, no. 7, pp. 1004-1023, 2009.
[9] J. Onton, A. Delorme, and S. Makeig, "Frontal midline EEG dynamics during working memory," NeuroImage, vol. 27, no. 2, pp. 341-356, 2005.
[10] T. Harmony, "The functional significance of delta oscillations in cognitive processing," Frontiers in Integrative Neuroscience, vol. 7, p. 83, 2013.
[11] A. L. Goldberger et al., "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals," Circulation, vol. 101, no. 23, pp. e215-e220, 2000.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Spor Alanındaki Bireysel Ölçümlerde Sensör ve Gps Kullanımı

Meryem Fulya Görhan[a], Sebiha Gölünük Başpınar[b]*

[a]MEB, Huriye Aşkar Ortaokulu, Bilişim Teknolojileri Öğrt. Afyonkarahisar/Türkiye.
[b]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Afyonkarahisar/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** fulyamg@gmail.com

ÖZET

Gelişen ve dijitalleşen dünyada teknoloji kullanımı da hızlı bir gelişim göstermektedir. Gelişen teknolojiler arasında yer alan sensörler ile biyolojik ve fiziksel özellikler ile ilgili ölçümler yapılmaktadır. Sensörler, ortamda bulunan niceliksel bir değişikliği elektrik sinyallerine çevirerek elektronik sistemlere aktarmak için kullanılmaktadır. Ölçüm yapılarak elde edilen verinin belli bir aralıklarla değişim ile sensörleri bir anahtar gibi harekete geçirebilmektedir. Spor bilimleri alanında sensör sistemleri daha çok hareket ve performans, fizyolojik izleme, biyomekanik analiz, sakatlık önleme rehabilitasyon, giydirilebilir teknoloji gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır. Sporcularda en yaygın kullanılanlardan Global Pozisyon Sistemi (GPS) antreman yada müsabaka sırasında hız, mesafe, ivme ve konum verilerini, nabız değerlerini anlık takip edebilmektedir. Antrenman esnasında kalp atım hızı belli bir değerin üzerine çıktığında bireylere uyarıcı mesajlar sunarak, anlık bildirim yapabilmektedir. Sanal gerçeklik gözlüğü ile vestibüler rehabilitasyon teknolojisinin kullanılması, daha gerçekçi ve sürükleyici bir ortamın simüle edilmesine olanak sağlar. Bu sayede sporcuların sakatlanma sonrası rehabilitasyon sürecinde kullanılabilmesine olanak tanır. Spor bilimleri alanında çocuklar, aktif sporcular ve orta yaş gruplarında sensörler yardımıyla üretilen sistemler kullanım amacına göre kullanıma sunulmaktadır. Sonuç olarak sporcu performansı gibi bir değişkene odaklanmış giyilebilir teknolojilere yönelik araştırmalara ulaşılmakla birlikte bireysel ölçümlerde sensör ve GPS kullanımı birçok amaç için kullanılmaktadır ve giderek yaygınlaşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Bireysel antreman, GPS, Literatür çalışması, Sensör.*

The Use of Sensors and GPS in Individual Measurements in Sports Fields

ABSTRACT

In our rapidly developing and digitalizing world, the use of technology is also evolving. Sensors, among other developing technologies, are used to measure biological and physical characteristics. Sensors are used to convert quantitative changes in the environment into electrical signals and transmit them to electronic systems. The data obtained through measurement can activate sensors like a switch by changing at certain intervals. In the field of sports science, sensor systems are used extensively in areas such as movement and performance, physiological monitoring, biomechanical analysis, injury prevention and rehabilitation, and wearable technology. Among the most commonly used systems for athletes is the Global Positioning System (GPS), which can instantly track speed, distance, acceleration, position data, and heart rate during training or competition. It can provide warning messages and instant notifications to individuals when their heart rate exceeds a certain value during training. The use of virtual reality glasses in vestibular rehabilitation technology allows for the simulation of a more realistic and immersive environment. This enables its use in the rehabilitation process after injury for athletes. In the field of sports science, systems produced with the help of sensors are offered for use in children, active athletes, and middle-aged groups, according to their intended purpose. In conclusion, while research on wearable technologies focused on variables such as athlete performance is emerging, the use of sensors and GPS for individual measurements is widely employed for many purposes.

Keywords: *Individual training, GPS, Literature review, Sensor.*

I. GİRİŞ

Bilginin öneminin arttığı bilgi çağında teknoloji hızlı bir gelişim göstermektedir. Bu gelişimin sonucunda robotik teknolojiler, sensörler, mobil uygulamalar, akıllı sistemler ve yapay zeka hayatın her alanında karşımıza çıkabilmektedir. Sensörler ölçüm yapılarak elde edilen verinin belli bir aralıkta olmasına göre bir anahtarı harekete geçirebilmektedir. Ayrıca ortamda bulunan niceliksel bir değişikliği elektrik sinyallerine çevirerek elektronik sistemlere aktarmak için kullanılabilmektedir[1].

Diğer bir yandan gelişen teknolojiler arasında yer alan sensörler ile biyolojik, kimyasal ve fiziksel özellikler ile ilgili ölçümler yapılmaktadır. Spor bilimleri alanında sensör sistemleri daha çok hareket ve performans, fizyolojik izleme, biyomekanik analiz, sakatlık önleme rehabilitasyon, giydirilebilir teknoloji gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu sayede sporcuların sakatlanma sonrası rehabilitasyon sürecinde kullanılabilmesine olanak tanınır[2].

GPS, dünyadaki her yeri, değişken hava koşullarında yüksek doğrulukta ve üç boyutlu olarak konum, hız ve zaman bilgilerini sağlayan bir uydu sistemidir. GPS'in kökeni ABD'nin askeri amaçlar için bir uydu tabanlı navigasyon sistemine duyduğu ihtiyaçlara dayanır. Bu doğrultuda 1993 yılında GPS'in askeri alanlarda tam işlevselliğe ulaştığı, sivil kullanıcıların ise 2 Mayıs 2000 tarihi itibariyle yüksek doğrulukta GPS kullanabildiği ifade edilmektedir[3].

Küresel konumlandırma sistemi (GPS) günlük hayatımızda derin etkisinin farkına varılmadığı halde, günlük yaşamımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. GPS, günlük hareketliliğimizi yönetmede önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte GPS kişisel özgüvenin ve özgürlük duygusunu geliştirmiştir. Bununla birlikte GPS verilerinden yararlanmak suretiyle; akıllı şehirler, trafik akışının optimize edilmesi ve diğer kaynakları daha etkin bir biçimde yönetilmesi mümkün olmaktadır[3].

Küresel konumlandırma sistemleri (GPS) ile futbolcuların maç ve antrenman sırasında maruz kalabildiği dış yükler objektif bir şekilde izlenebilmektedir. GPS tabanlı dış yük göstergeleri; toplam koşu mesafesi, sprint sayısı, ivmelenme ve yavaşlama sayıları gibi parametrelerin yanında daha karmaşık yük bileşenlerini de kapsamaktadır[4].

Bu çalışmada bireylerle ilgili ölçümler yapılan spor alanındaki sensör ve GPS kullanılan mevcut çalışmalar incelenerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma araştırmacılara ve bu alanda çalışan kişilere yardımcı bilgiler içeren bir derlemedir. Bu çalışmada GPS kullanılan spor alanındaki mevcut çalışmalar incelenmiştir. «Gps» ve «sporcu» kelimeleri kullanılarak literatürdeki spor alanındaki çalışmalar araştırılmıştır. Ulaşılan çalışmalardan bireysel ölçümlerle ilgili olanlar seçilmiştir. Farklı spor branşlarından çalışmalar sunulmuştur.

III. SONUÇLAR

Referans [5]'te GPS kullanımı incelenmiştir. Dağcılık sporu yapılan telefon şebekesinin bulunmadığı alanlarda çalıştırılabilen bir GPS cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanan cihazda kablosuz sensör ağı ve LoRa Shield kullanılmıştır. Bu cihaz, güvenliği artırmak amacıyla kullanılmıştır. İletişim kanallarının olmadığı durumlarda dağcıların konumlarını belirleme ve acil durumlarda tahliye ekiplerine rehberlik ederek hızlı müdahale imkanı sunma gibi önemli avantajlara sahip olmaktadır. Dağcının konumu genellikle ana kamp veya kurtarma ekibi karakolu tarafından takip edilmiştir. Sistem, konum takibi için bir veri alıcı anten aracılığıyla çalışmıştır. Dağcılardan alınan konum bilgileri, alıcı-verici antenler aracılığıyla iletilmiş ve bu veriler ardından bir monitör ekranında görselleştirilmiştir. Sistem, enlem ve boylam değerlerini sağlarken, kullanıcı listesi üzerinden belirlenen merkez noktasından 2 kilometrelik bir alan içinde yer alan dağcıların güvenli ya da tehlikeli bölgelerde olup olmadığını gösteren bir işaretleyici de sunarak güvenli bölgeler belirlenmiştir. Bu özellik, kapsama alanındaki dağcıların durumunu anlık olarak izleme imkanı tanımaktadır.

GPS ve koşu parkurları ile ilgili referans [6]'da koşucuların koşu rotaları boyunca çevre özelliklerine yönelik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, bir fitness veri platformu olan Endomondo'dan koşu parkuru verileri toplanmış ve bu veriler, koşucuların ikamet ettikleri yerlerin belirlenmesi için kullanılmıştır. Aynı zamanda, yerleşim alanları ve koşu güzergahları boyunca farklı çevresel değişkenleri hesaplamak üzere açık coğrafi verilerden faydalanılmıştır. Kullanıcılar tarafından herkese açık olarak paylaşılan antrenman verileri indirilmiş. Örneklem, Endomondo kullanan ve 2015 yılında bilgilerini platforma yükleyen Hollandalı koşuculardan oluşmaktadır. Antrenmanın GPS rotası ve kullanıcıların katıldığı konum belirlenmiştir. Elde edilen veriler, yılda 48 kereden fazla koşan katılımcıların güzergâhları üzerindeki yeşillik seviyesi ile su kütlesi oranlarının ortalamalarının istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha yüksek olduğunu göstermiştir. Öte yandan, yılda 24 kereden az koşan şehir koşucularının rota verilerine göre arazi kullanım çeşitliliği ve kentleşme endeksinin karşılaştırmalı olarak daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Referans [7] de tenis sporunda GPS ile UWB ultra-wideband konumlandırma sistemlerinin doğruluğu hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. UWB cihazı decawave UWB sensörü ve Arduino Pro Mini kullanılarak tasarlanmıştır. Deneyler için yaklaşık 200 metrekarelik (tenis kortu boyutlarında) bir test alanı seçilmiştir. Bu alanın sol alt köşesi (0, 0) koordinatı, sağ üst köşesi ise (10, 20) koordinatı ile tanımlanmıştır. Test sahası, X ekseni boyunca 10 metre genişliğe ve Y ekseni boyunca 20 metre uzunluğa sahiptir. Farklı noktalarda UWB ve GPS koordinatları ile yüksekliğe ilişkin veriler toplanmıştır. Tam mesafe ve yükseklik ölçümleri lazerli mesafe ölçer kullanılarak alınmış ve bu ölçümlerle koordinatlar işaretlenmiştir. Yapılan nicel analizler, UWB tabanlı sistemin GPS tabanlı konumlandırma (1 Hz ve 10 Hz) sistemine göre daha iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, UWB sisteminin doğruluğunun sınır bölgelerine yaklaşıldıkça azaldığı gözlemlenmiştir.

Referans [8]'in ise temel amacı, ragbi sporunda GPS ile radar cihazlarını sprint kuvvet-hız ölçümlerini incelemektir. Kuvvet-hız değişkenlerini belirlemek amacıyla, en az 5 dakikalık dinlenme süreleriyle iki 50 metrelik aralıklı sprint gerçekleştirilmiştir. Sprint sırasında koşu hızı, oyuncuların sırtlarının üst kısmına yerleştirilen bir radar cihazı ve iki adet GPS ünitesi tarafından eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Radar ve GPS cihazlarından elde edilen Kuvvet-hız verileri incelenerek GPS cihazlarının, takım sporları oyuncularında sprint özelliklerinin değerlendirmesinde radar cihazlarına karşı hem geçerli hem de güvenilir bir alternatif oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Bir diğer referans olan [9]'da atletik kondisyonda GPS verileri kullanılarak hız ölçümü yapılmış ve bir seansta top kullanılırken, diğerinde kullanılmamıştır. Elde edilen bulgular, top kullanılmasının 16 km/saat hızın üzerinde koşulan süreyi azalttığını ortaya koymuştur. Bu durum, fiziksel kondisyonun spora yönelik becerilerden ziyade fizyolojik ihtiyaçlara öncelik verilmesi gerektiğini işaret etmiştir. GPS teknolojisinin gelecekteki Spor Bilimciler için antrenmanları daha etkili bir şekilde kişiselleştirme konusunda değerli bir araç olduğunu göstermiştir.

Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) ve giyilebilir izleme teknolojileri, spor biliminde antrenman yükünü ölçmek amacıyla giderek daha fazla tercih edilmektedir. Referans [10]'da Kore kadın milli kros kayak takımının tüm yıllık antrenman döngüsünü GPS ve kalp atış hızına dayalı giyilebilir sensörler aracılığıyla analiz edilmiştir. 2022-2023 sezonu boyunca milli takımın üç üyesi, toplamda 52 hafta boyunca takip edilmiştir. Çalışmada, yıl boyunca kaydedilen toplam antrenman hacmi 667,72 saat olarak belirlenmiş ve bu değer, yayınlanmış Dünya Kayak Federasyonu'nun (WCF) kıyaslama verilerinin yaklaşık %18-30 altında kalmıştır. Göreceli dayanıklılık yoğunluğu dağılımı, %91,5'inin 1-2. bölgelere denk geldiği kutuplaşmış bir modeli işaret etse de mutlak dayanıklılık hacminin (516,08 saat) WCF referans değerlerinden oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Referans [11]'de ise Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) ve kalp atış hızı (HR) teknolojisi kullanılarak, sörf antrenmanının zaman-hareket analizi hem tanımlayıcı hem de nicel olarak değerlendirilmiştir. Araştırmaya katılan 15 erkek sörf sporcusu, GPS cihazı ve kalp atış sensörü takarak 2 saatlik bir sörf antrenmanı süresince veriler elde edilmiştir. Antrenman sırasında tüm etkinlik, bireysel dijital video kaydıyla takip edilmiştir. Bulgulara göre katılımcılar, 2 saatlik sörf antrenmanı boyunca toplam 6293,2 ± 1826,1 metre mesafe kat etmiş ve ortalama hızları 52,4 ± 15,2 metre/dakika olarak ölçülmüştür. Ortalama kalp atış hızı (HRaverage) 128 ± 13 atım/dakika, en yüksek kalp atış hızı (HRpeak) ise 171 ± 12 atım/dakika olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı aktiviteler için harcanan sürelerin oranları şu şekilde belirlenmiştir: kürek çekme %42,6 ± %9,9, dalga yakalamak için sprint kürek çekme %4,1 ± %1,2, sabit durma %52,8 ± %12,4, dalga üzerinde sörf yapma %2,5 ± %1,9 ve sörf tahtasından kurtulma %2,1 ± %1,7. 2 saatlik bir sörf antrenman seansının rekabetçi yarışlara kıyasla daha düşük yoğunlukta gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

IV. ÇIKARIM

GPS cihazı spor alanında koşu, kayak, dağcılık, ragbi ve futbol gibi farklı branşlarda kullanılmaktadır. Mevcut çalışmalar incelendiğinde GPS cihazı ile elde edilen verilerin en fazla konum, ivme ve hız değişkenlerini hesaplamak için kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca GPS sistemlerinin, geniş alan (UWB) ve radar teknolojisi gibi farklı teknolojilerle karşılaştırması yapılmaktadır. GPS sistemlerinin radar teknolojisine bir alternatif oluşturduğu diğer yandan ise UWB teknolojisinin GPS sistemlerinden daha iyi olduğu belirtilmiştir. GPS teknolojisinin farklı sensörlerle birlikte kullanımı ile daha geniş ve farklı çalışmalara imkan sağlanmaktadır. Örneğin sanal gerçeklik gözlüğü ile vestibüler rehabilitasyon teknolojisinin kullanılması, daha gerçekçi ve sürükleyici bir ortamın simüle edilmesine olanak sağlamaktadır [12].

Sonuç olarak sporcu performansı gibi bir değişkene odaklanmış giyilebilir teknolojilere yönelik araştırmalara ulaşılmakla birlikte bireysel ölçümlerde sensör ve GPS kullanımı birçok amaç için yaygınlaşarak kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] D. Engin. (2014) Ege Üniversitesi Ege MYO Mekatronik Programı Sensörler ve Dönüştürücüler. [Online]. Erişim: https://tec.ege.edu.tr/dersler/sensorler.pdf

[2] M. Tanış, "Sahte GPS sinyallerine karşı gömülü sistem tasarımı ve mekatronik sistemlerde uygulanması," Ph.D. thesis, Department of Mechatronic Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye, Apr. 2024.

[3] B. Aydemir, and D. Sevinç Yilmaz, "Elit Kadın Futbolcularında Yük Toleransının GPS Tabanlı Göstergelerle Modellenmesi: Sezon İçi Bir Yaklaşım," Dede Korkut Spor Bilimleri Dergisi, 4(1), 2026.

[4] Z. Akyıldız, & C.S. Erdoğan. "Mikro elektromekanik sistemlerin sporda kullanımı," *Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 16(1), 40-52, 2022.

[5] E.N. Ardina, A.E. Jayati, M. Sipan, R.K. Pramuyanti, & P. Muliandhi, "Tracking device for the mountaineers using GPS," IEEE *International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT*), 328-332, Nov. 2022.

[6] S. Zhang, Z. Wang, M. Helbich, & D. Ettema, "Assessing runners' exposure to natural and built environments in the Netherlands: A descriptive assessment based on GPS tracking*", International Journal of Environmental Health Research*, 34(4), 2104-2123, 2024.

[7] A. Waqar, I. Ahmad, D. Habibi, & Q.V. Phung, " Analysis of GPS and UWB positioning system for athlete tracking," *Measurement: Sensors*, 14, 100036, 2021.

[8] P. Clavel, C. Leduc, J.B. Morin, C. Owen, P. Samozino, A. Peeters, M. Buchheit & M. Lacome, "Concurrent validity and reliability of sprinting force–velocity profile assessed with GPS devices in elite athletes," *International Journal Of Sports Physiology And Performance*, 17(10), 1527-1531, 2022.

[9] A. Cudicio, F. Ricciardi, & A. Esposito, "Prıorıtızıng ındıvıdual demands ın sports traınıng: ınsıghts from gps data analysıs," *Italıan Journal Of Health Educatıon, Sport And Inclusıve Dıdactıcs*, 8(3), 2024.

[10] X. Xiao, S. Moon, Y. Kim, & Y. Choi, "Quantitative Analysis of Annual Training Volume and Periodization Patterns in Elite Female Cross-Country Skiers Using GPS Monitoring: A Three-Athlete Case Study." *Bioengineering*, 13(4), 429, 2026.

[11] J.L. Secomb, J.M. Sheppard, & B.J. Dascombe, "Time–motion analysis of a 2-hour surfing training session," *International Journal of Sports Physiology and Performance,* 10(1), 17-22, 2015.

[12] R. N. Akbaş "Vestibüler Rehabilitasyonda Sanal Gerçeklik Teknolojisi," *IGUSABDER*, 15, 639-645, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

3B Multipl Skleroz Lezyon Segmentasyonu için Lezyon-Duyarlı Örnekleme ve Aşamalı Transfer Öğrenme

Murat Arıcan [a], Kemal Polat [b]*

[a] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Disiplinlerarası Sinir Bilimleri AD, Bolu/Türkiye.
[b] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: muratarican@gmail.com

ÖZET

Multipl Skleroz (MS) tanılama ve izlem süreçlerinde Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG), demiyelinizan lezyonların uzaysal ve zamansal dağılımını belirlemede altın standart niteliğinde bir biyobelirteçtir. Ancak lezyonların morfolojik heterojenliği, çevre dokuyla düşük kontrast oranları ve çekim parametrelerine bağlı yoğunluk varyasyonları, manuel ve otomatize segmentasyonda standardizasyonu zorlaştırmaktadır. Bu çalışma, kısıtlı veri kümelerinde MS lezyon segmentasyonu başarımını artırmak amacıyla transfer öğrenme stratejilerinin etkinliğini araştırmaktadır. Çalışma kapsamında Yalın UNet, Yalın Swin-UNETR ve Transfer-Swin-UNETR modelleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Transfer öğrenme aşamasında, 3B beyin MRG'den elde edilen evrensel özniteliklerin korunarak aktarılması amacıyla BraTS veri kümesi ile ön eğitilmiş ağırlıklar kullanılmıştır. Eğitim sürecinde, kodlayıcı katmanları aşamalı dondurma çözme tekniği ile sisteme dahil edilmiştir. Veri kümesindeki sınıfsal dengesizliği gidermek ve modelin küçük lezyonları yakalama kabiliyetini artırmak için lezyon odaklı örnekleme yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca, modelin anatomik varyasyonlara karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla elastik deformasyon ve yoğunluk değişimlerini içeren veri artırma tekniklerinden yararlanılmıştır. Deneysel sonuçlar, transfer öğrenme tabanlı yöntemin; Dice skoru: 0,691 ve HD95: 15,069 değerleri ile yalın modellerden daha yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, MS lezyon segmentasyonunda transfer öğrenme ve aşamalı eğitim stratejilerinin, özellikle sınırlı veri setlerinde segmentasyon hassasiyetini ve modelin genellenebilirliğini optimize etmekte kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Aşamalı transfer öğrenme, Lezyon-Duyarlı örnekleme, Lezyon segmentasyonu, Multipl skleroz, Yama tabanlı eğitim.*

Lesion-Aware Sampling and Progressive Transfer Learning for 3D Multiple Sclerosis Lesion Segmentation

Murat Arıcan [a], Kemal Polat [b]*

[a] Bolu Abant Izzet Baysal University, Graduate School of Education, Interdisciplinary Department of Neurosciences, Bolu/Türkiye.
[b] Bolu Abant Izzet Baysal University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bolu/Türkiye.
* Corresponding Author: muratarican@gmail.com

ABSTRACT

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a gold-standard biomarker for determining the spatial and temporal distribution of demyelinating lesions in the diagnosis and monitoring processes of Multiple Sclerosis (MS). However, the morphological heterogeneity of lesions, low contrast ratios with surrounding tissue, and intensity variations depending on acquisition parameters make standardization difficult in manual and automated segmentation. This study investigates the effectiveness of transfer learning strategies to increase the success of MS lesion segmentation in limited datasets. Within the scope of the study, Vanilla UNet, Vanilla Swin-UNETR, and Transfer-Swin-UNETR models were analysed comparatively. In the transfer learning phase, pre-trained weights with the BraTS dataset were used to preserve and transfer universal features obtained from 3D brain MRI. During the training process, encoder layers were included in the training with a progressive unfreezing technique. To eliminate class imbalance in the dataset and increase the model's ability to capture small lesions, a lesion-aware sampling method was applied. Additionally, data

augmentation techniques including elastic deformation and intensity changes were utilized to increase the model's resistance to different anatomical variations. Experimental results revealed that the transfer learning-based method showed better performance than vanilla methods, with a Dice score of 0.691 and HD95 of 15.069. The data obtained show that transfer learning and progressive training strategies play a critical role in optimizing segmentation sensitivity and the generalizability of the model in MS lesion segmentation, especially in limited datasets.

Keywords: *Lesion-Aware sampling, Lesion segmentation, Multiple sclerosis, Patch-based training, Progressive transfer learning.*

I. INTRODUCTİON

Multiple Sclerosis (MS) is a disease manifested by sclerotic plaques resulting from demyelination and axonal transections within the brain and spinal cord, which develop due to aberrations in the individual's immune system. Inflammation is generally perivenular, and lesions typically occur in the periventricular subcortical white matter, corpus callosum, optic nerve, brainstem, cerebellum, and spinal cord. Additionally, cortical lesions have also been identified. The disease is characterized by neurological deficits dissemination in time and space. It is observed twice as frequently in women compared to men, primarily involving white matter damage within the central nervous system [1], [2].

The disease is characterized by a varying range of neurological deficits. There are three main disease types classified based on clinical disease course: (1) Relapsing-Remitting (RR), (2) Secondary Progressive (SP), and (3) Primary Progressive (PP).

Regrettably, there is currently no single symptom, physical finding, or laboratory test to definitively diagnose MS. Magnetic Resonance Imaging (MRI), cerebrospinal fluid analysis, and evoked potentials are utilized for diagnostic purposes [3], [4], [5].

The myelin sheath, which protects nerve cell fibers, contains lipids and repels water. In regions where MS damages the myelin sheath, the sheath is stripped away. Due to this lipid loss, the affected area retains more water and appears as bright white spots or lesions, depending on the type of MRI scan. Currently, MRI is an effective, non-invasive method for diagnosing MS [6], [7], [8]. However, diagnosing MS based on MRI neuroimaging modalities is time-consuming and challenging for clinicians. Consequently, novel methods are proposed to accurately identify lesion areas.

Diagnosis via MRI demands a highly specialized workforce. Furthermore, central nervous system alterations occurring in MS must be monitored periodically. This requirement imposes an additional clinical workload on specialists.

With the aid of deep learning technology, a computer-aided diagnosis and monitoring system can be developed. By utilizing MRI scans, this system could automatically perform MS diagnosis, lesion detection and segmentation, calculation of lesion volume along with retrospective volumetric changes, tracking of lesion counts and historical count variations, as well as lesion localization and retrospective regional change mapping. Consequently, the required clinical workload for specialists can be substantially mitigated.

In the literature, the success of transfer learning strategies in overcoming these challenges is noteworthy. Previous studies demonstrate that fine-tuning models trained on different pathologies, such as brain tumours or metastases, using MS data yields higher sensitivity and positive predictive values even on small datasets compared to models trained from scratch [9]. Moreover, it is emphasized that models like 2.5D FCA-DenseNet, which undergo pre-training on large-scale public datasets containing white matter hyperintensities and subsequent fine-tuning on local, small datasets, effectively resolve the data scarcity issue—particularly in the segmentation of contrast-enhancing lesions (CEL)—thereby improving clinical diagnostic workflows [10].

II. MATERİAL AND METHODS

The methodology employed in this study comprises the stages of dataset preparation, preprocessing, data augmentation, and model training, as illustrated in Figure 1.

A. Dataset

In this study, the training records of the Multiple Sclerosis Lesion Segmentation (MSLesSeg) dataset were utilized [11]. The dataset consists of 93 3D MRI scans obtained from 53 patients at different time intervals. The records were acquired using FLAIR, T1, and T2 sequences. The dataset was partitioned into 80% for training and 20% for validation. To prevent scans of the same patient taken at different times from being included in both the training and validation sets simultaneously during the split, a patient-based partitioning

process was executed. Within this scope, 71 scans belonging to 42 patients were assigned to the training set, while 22 scans belonging to 11 patients were allocated to the validation set.

In addition to the preprocessing stages inherently used in the preparation of the dataset, a percentile-based intensity range clipping process was applied specifically within this study to eliminate noise originating from artifacts or outliers. To ensure a more stable convergence during model training, the images were subjected to Z-score normalization, which is a standardization method based on mean and standard deviation values. In the third step, spatial padding was applied to the volumetric data to satisfy the dimension requirements of the downsampling and upsampling layers of the U-Net architecture.

To enhance the generalization capability of the model and mitigate the risk of overfitting, a data augmentation strategy was implemented. In this step, the intensity range clipping method was employed to normalize noise and brightness anomalies. To improve feature extraction by emphasizing subtle and ambiguous lesion boundaries, the contrast-limited adaptive histogram equalization algorithm was utilized. Finally, a three-dimensional spatial cropping operation was performed on the volumetric data to both reduce computational overhead and focus the model's attention on the anatomically most relevant regions.

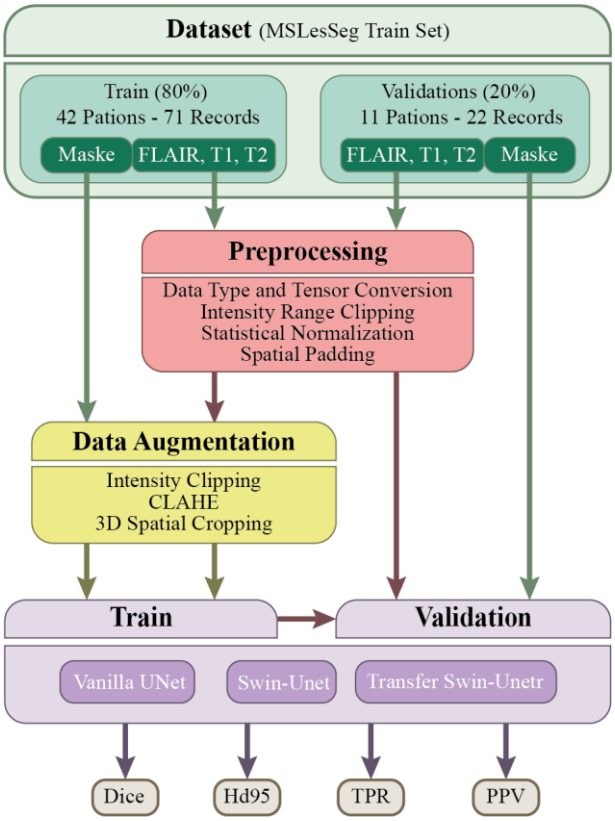


Figure 1. The methodology employed in this study

B. Models

An ablation strategy was adopted in this study to facilitate a comparative analysis between the transfer learning model and other alternative architectures. At this stage, the U-Net architecture and its variants, which permit the processing of three-dimensional volumetric data, were utilized. The MONAI library was employed for model implementations [12]. As the baseline model, the standard U-Net provided in the library was executed in its native form without any structural modifications. The U-Net architecture is a symmetrical, convolutional neural network widely utilized in visual analysis tasks requiring high precision, such as biomedical image segmentation. It is capable of capturing both the global context and local details of the input image. It owes its name to its general structure, which resembles the letter "U". The architecture comprises two main pathways: a contracting path and an expanding path. The defining characteristic of U-Net is the skip connections that link these two pathways. Since the baseline U-Net inherently evaluates only local neighborhood relationships, it may experience difficulties in preserving long-range dependencies between distant regions of the image.

The second model, Swin-UNETR, integrates the hierarchical structure of U-Net with Vision Transformer technology [13]. While conventional methods scan images as small, individual pixels, Swin-UNETR partitions the image into blocks designated as patches. The term "Swin" (Shifted Window) originates from the shifting

mechanism used to process these patch blocks. This approach enables the model to effectively capture the relationship between information located at one corner of the image and the opposite corner. Particularly in lesion imaging, understanding the relationship between a lesion and its surrounding anatomy plays a critical role. This model provides a deeper perspective when dealing with large and complex 3D datasets.

The transfer learning approach, which constitutes the third model evaluated in this study, initializes training by utilizing the pre-trained weights of a completed model rather than starting the training process from scratch. Transfer Swin-UNETR is constructed by replacing the contracting path—the section where the standard Swin-UNETR model receives the input—with a pre-trained model that has undergone training on a large-scale dataset. This architectural modification enhances the model's visual representation capability when working with small-scale datasets, as is the case in this study. In this work, pre-trained weights from the BraTS (Brain Tumour Segmentation) challenge were utilized [14]. To apply these specific weights to our target task, a customized loading protocol was implemented. BraTS models are designed for the automated detection of brain tumours, utilizing images acquired across T1, T1-contrast, T2, and FLAIR sequences. An adaptation process was conducted between the layers of the source weight file and our target model to reconcile the input channel discrepancy. The original four-channel weights of the BraTS model were reduced to three channels by excluding the T1-contrast channel. This adjustment eliminated convergence difficulties by establishing more stable initial parameters. In the second stage of the loading protocol, a hierarchical freezing-thawing strategy was applied. To preserve the transferred weights during the initial phase, all parameters of the contracting path component were frozen by disabling gradient updates. This approach allows the model to learn high-level features specific to the target dataset without losing general visual representations. As the training process advanced, the layers of the contracting path were gradually unfrozen from deeper to shallower layers. This progressive optimization aims to increase the model's accuracy through fine-tuning while maintaining structural stability.

As the final stage of model training, lesion-aware sampling was implemented. The volume of Multiple Sclerosis lesions is remarkably small relative to the total brain volume. More than 99% of a brain MRI volume consists of healthy tissue or background voxels, whereas lesion pixels account for less than 1% of the entire image. Consequently, a severe class imbalance problem arises. Selecting random patches from images during training can cause the model to be exposed exclusively to patches containing no pathological changes, leading to the complete omission of lesion characteristics. Lesion-aware sampling is a strategy developed to mitigate this mathematical imbalance by artificially steering the model's focus toward the minority class. When extracting a patch from a volume, the spatial centre of the patch is not determined randomly. Instead, the system first scans the lesion mask and stores the voxel coordinates in a list. Subsequently, the centres of the patches are selected from these lesion coordinates based on a 3:1 ratio. This mechanism ensures that a specific quantity of lesion tissue is consistently presented to the model in every training loop. A critical consideration here is that excessively increasing the positive sampling ratio may cause the model to fail in recognizing healthy tissue anatomy, thereby increasing the false positive rate.

During the training phase, the volumes were presented to the model as patches with dimensions of 96 x 96 x 96 using a batch size of four. Training was conducted for 200 epochs, initiating with a learning rate of 10^{-3}. To evaluate the model's performance during the training phase, DiceFocalLoss—a hybrid loss function that combines the Dice and Focal loss formulations given in Equations 1-3 with equal weights—was selected. This function serves as a highly sensitive metric for handling class imbalance problems. In Equation 1, y_{truth} represents the ground truth mask values, $y_{predict}$ denotes the predicted mask values, and $\in$ represents a very small constant introduced to prevent a division-by-zero error during the computation.

$$Dice\ Loss = 1 - \frac{2\sum(y_{truth} \times y_{predict}) + \in}{\sum(y_{truth} + y_{predict}) + \in} \quad (1)$$

In Equation 2, p_t represents the probability of correct prediction, $\alpha_t$denotes the weighting factor for imbalanced datasets, and γ is the focal parameter.

$$Focal\ Loss = -\alpha_t(1 - p_t)^{\gamma} \log(p_t) \quad (2)$$

$$Total\ Loss = (Dice\ Loss + Focal\ Loss)/2 \quad (3)$$

C. Metrics

To evaluate the performance of the models, the Dice Similarity Coefficient (DSC) given in Equation 4, which measures the amount of overlap between the predicted and ground truth lesions, and the 95th percentile Hausdorff

Distance (HD95) given in Equation 5, which measures the distance between the predicted and ground truth lesion boundaries, were utilized.

$$DSC = \frac{2\sum(y_{truth} \times y_{predict}) + \epsilon}{\sum(y_{truth} + y_{predict}) + \epsilon} \quad (4)$$

$$HD95(A, B) = \max\left(p95 \min d(a, b), p95 \min d(b, a)\right) \quad (5)$$

In addition to these, the True Positive Rate (TPR) given in Equation 6, which measures the model's ability to detect true lesions, and the Positive Predictive Value (PPV) given in Equation 7, which determines the precision of the predicted lesions, were employed. Here, True Positives (TP) represent the voxels that actually belong to class 1 and are correctly predicted. False Positives (FP) represent the classes that are actually 0 but predicted as 1, while False Negatives (FN) represent the classes that are actually 1 but predicted as 0.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

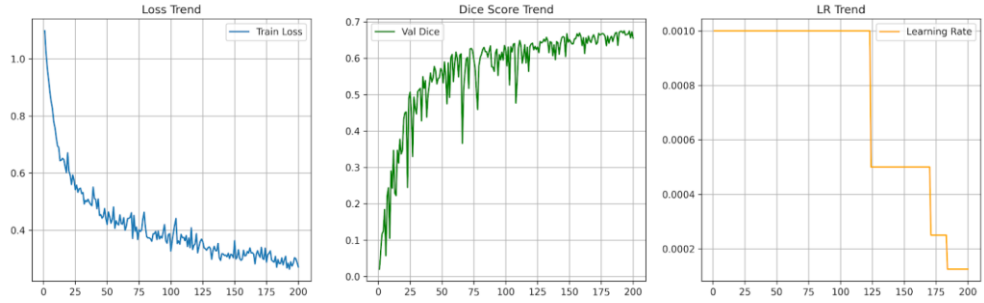
Among these metrics used to evaluate the model, the optimal values are 1 for DSC, TPR, and PPV, and 0 for HD95.

III. Results

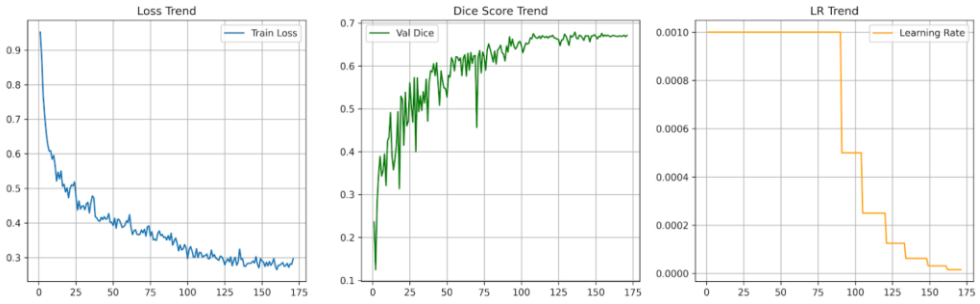
Table 1. Experimental results

	DSC ↗	HD95 ↘	TPR ↗	PPV ↗
Vanilla U-Net	0,675	19,042	0,656	0,731
Swin-UNetr	0,678	20,210	0,653	0,735
Transfer Swin-UNetr	**0,691**	**15,069**	**0,671**	**0,748**

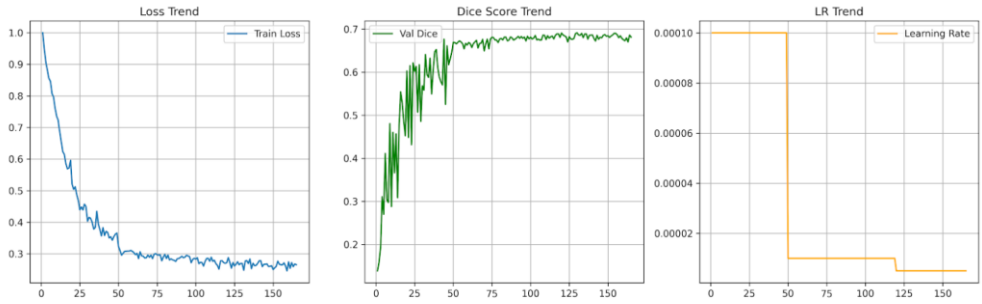
The experimental results obtained from this study are presented in Table 1. Transfer Swin-UNETR achieved the highest performance across all primary metrics (DSC, HD95, TPR, and PPV), establishing itself as the clear leader. In particular, a Dice Similarity Coefficient of 0.691 and a reduced Hausdorff Distance of 15.069 demonstrate that the model not only captures the target structures effectively but also delineates boundary outlines with significantly higher precision and near-ground-truth accuracy.



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Performance curves for all three models: (a) Vanilla U-Net, (b) Swin-UNETR, (c) Transfer Swin-UNETR

The performance curves for all three models are illustrated in Figure 2. As shown in the learning curves of Vanilla U-Net and baseline Swin-UNETR in Figures 2a and 2b, both models exhibit a similar learning trajectory. While the training loss steadily declines, the validation Dice score follows an upward trend. However, both models display substantial fluctuations (noise) in their validation scores, particularly during the first 75 epochs. This behavior demonstrates that although the models occasionally struggle while learning features from scratch, they achieve a more stable state around the 150th epoch due to the progressive reduction of the learning rate.

As illustrated in Figure 3c, the loss curve of the Transfer Swin-UNETR model exhibits a much steeper and more rapid decline, reaching saturation at an early stage around the 50th epoch. The most striking distinction is observed in the Dice score. This model reaches and stabilizes at accuracy levels around the 50th epoch that the other models could only achieve by the 150th epoch. The significantly reduced oscillations in the curves indicate that, through transfer learning, the model rapidly adapts its pre-existing structural knowledge to the target dataset.

IV. Discussion

The tabular results demonstrate that the Transfer Swin-UNETR model achieves an absolute superiority over its competitors across all critical metrics. In particular, the prominent decrease in the Hausdorff Distance (HD95) value confirms that the model delineates segmentation boundaries in a manner closest to the ground truth. From an architectural perspective, although the hierarchical Vision Transformer structure of Swin-UNETR succeeds in capturing both local and global features within the images, the full realization of this potential was only rendered possible through the adoption of the transfer learning strategy.

Since the baseline models (Vanilla U-Net and baseline Swin-UNETR) attempt to construct feature maps from scratch, they exhibited high fluctuations (noise) and delayed convergence during the training process. In contrast, Transfer Swin-UNETR rapidly minimized training loss and traced a significantly more stable learning curve, leveraging the advantage provided by pre-trained weights. This phenomenon serves as an efficiency indicator demonstrating that the model shifts its focus from "learning to recognize" pathological structures toward "differentiating" them within the dataset.

V. Conclusion

Although a massive performance discrepancy between standard Convolutional Neural Networks (CNN) and modern Transformer-based architectures was not observed specifically for this dataset, the transfer learning process propelled the performance of the Transformer structure to a superior tier. The Transfer Swin-UNETR model generated the most clinically reliable results, particularly by minimizing boundary errors, as evidenced by its HD95 performance.

The realization of peak performance by the transfer-learned model—using a significantly lower learning rate and fewer epochs—presents a major optimization in terms of computational overhead.

References

[1] P. A. Calabresi, “Multiple Sclerosis and Demyelinating Conditions”, Goldman-Cecil Medicine, 27. bs, L. Goldman ve K. A. Cooney, Ed., Elsevier Ltd, 2023, 380, ss. 2498-2510.

[2] F. Nabizadeh, E. Ramezannezhad, A. Kargar, A. M. Sharafi, ve A. Ghaderi, “Diagnostic performance of artificial intelligence in multiple sclerosis: a systematic review and meta-analysis.”, Neurol Sci, c. 44, sy 2, ss. 499-517, Feb. 2023, doi: 10.1007/s10072-022-06460-7.

[3] M. T. Duong, A. M. Rauschecker, ve S. Mohan, “Diverse Applications of Artificial Intelligence in Neuroradiology”, Neuroimaging Clin N Am, c. 30, p 4, ss. 505-516, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.nic.2020.07.003.

[4] R. E. Gabr vd., “Brain and lesion segmentation in multiple sclerosis using fully convolutional neural networks: A large-scale study”, Multiple Sclerosis Journal, c. 26, sy 10, ss. 1217-1226, 2020, doi: 10.1177/1352458519856843.

[5] A. S. Lundervold ve A. Lundervold, "An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI", Z Med Phys, c. 29, sy 2, ss. 102-127, May. 2019, doi: 10.1016/j.zemedi.2018.11.002.
[6] H. Jiang vd., "A review of deep learning-based multiple-lesion recognition from medical images: classification, detection and segmentation", Comput Biol Med, c. 157, s. 106726, May. 2023, doi: 10.1016/j.compbiomed.2023.106726.
[7] F. Moazami, A. Lefevre-Utile, C. Papaloukas, ve V. Soumelis, "Machine Learning Approaches in Study of Multiple Sclerosis Disease Through Magnetic Resonance Images", Front Immunol, c. 12, Agu. 2021, doi: 10.3389/fimmu.2021.700582.
[8] A. Montolío vd., "Machine learning in diagnosis and disability prediction of multiple sclerosis using optical coherence tomography", Comput Biol Med, c. 133, s. 104416, Jun. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104416.
[9] Wahlig, S., Nedelec, P., Weiss, D., Rudie, J., Sugrue, L., & Rauschecker, A. (2023). 3D U-Net for automated detection of multiple sclerosis lesions: utility of transfer learning from other pathologies. Frontiers in Neuroscience, 17. https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1188336.
[10] Huang, L., Zhao, Z., An, L., Gong, Y., Wang, Y., Yang, Q., Wang, Z., Hu, G., Wang, Y., & Guo, C. (2023). 2.5D transfer deep learning model for segmentation of contrast-enhancing lesions on brain magnetic resonance imaging of multiple sclerosis and neuromyelitis optica spectrum disorder. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 14, 273 - 290. https://doi.org/10.21037/qims-23-846.
[11] Guarnera, F., Rondinella, A., Crispino, E. et al. MSLesSeg: baseline and benchmarking of a new Multiple Sclerosis Lesion Segmentation dataset. Sci Data 12, 920 (2025). https://doi.org/10.1038/s41597-025-05250-y
[12] Cardoso, M.J., Li, W., Brown, R., Ma, N., Kerfoot, E., Wang, Y., Murrey, B., Myronenko, A., Zhao, C., Yang, D., et al.: Monai: An open-source framework for deep learning in healthcare
[13] Ali Hatamizadeh, Vishwesh Nath, Yucheng Tang, Dong Yang, Holger R. Roth, and Daguang Xu. 2021. Swin UNETR: Swin Transformers for Semantic Segmentation of Brain Tumors in MRI Images. In Brainlesion: Glioma, Multiple Sclerosis, Stroke and Traumatic Brain Injuries: 7th International Workshop, BrainLes 2021, Held in Conjunction with MICCAI 2021, Virtual Event, September 27, 2021, Revised Selected Papers, Part I. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 272–284. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08999-2_22
[14] Baid, U., Ghodasara, S., Mohan, S., Bilello, M., Calabrese, E., Colak, E., Farahani, K., Kalpathy-Cramer, J., Kitamura, F. C., Pati, S., Prevedello, L., Rudie, J., Sako, C., Shinohara, R., Bergquist, T., Chai, R., Eddy, J., Elliott, J., Reade, W., Schaffter, T., Yu, T., Zheng, J., Davatzikos, C., Mongan, J., Hess, C., Cha, S., Villanueva-Meyer, J., Freymann, J. B., Kirby, J. S., Wiestler, B., Crivellaro, P., Colen, R. R., Kotrotsou, A., Marcus, D., Milchenko, M., Nazeri, A., Fathallah-Shaykh, H., Wiest, R., Jakab, A., Weber, M-A., Mahajan, A., Menze, B., Flanders, A E., Bakas, S., (2023) RSNA-ASNR-MICCAI-BraTS-2021 Dataset. The Cancer Imaging Archive DOI: 10.7937/jc8x-9874

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Tabular Verilerde Sinyal İşleme Filtrelerinin Uyku Bozukluğu Sınıflandırması Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Melih Yiğit Kotman[a], Beyza Dağ[a], Mehmet Milli[a], İsmail Hakkı Parlak[a], Ferhat Demiray[a]*

[a]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** melihkotman@gmail.com

ÖZET

Uyku bozuklukları hem bireysel sağlık hem de toplumsal üretkenlik açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Literatürde makine öğrenmesi tabanlı tanı sistemleri yaygın olarak incelenmiş olsa da çalışmaların büyük bölümü model mimarilerinin geliştirilmesi ve sınıf dengesizliğinin giderilmesine odaklanmıştır. Buna karşılık, zamansal bağımlılık içermeyen tabular sağlık verilerinde sinyal işleme tabanlı filtreleme yaklaşımlarının model davranışı üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde araştırılmıştır. Bu çalışmada, Sleep Health and Lifestyle veri seti üzerinde toplam 12 farklı filtreleme yöntemi (Low-pass, Wavelet, Moving Average, EMA, Savitzky–Golay, LOESS, Spline, Kalman, Median, Hampel, Gaussian ve ham veri senaryosu) farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile sistematik olarak değerlendirilmiştir. Performans analizi, sınıf dengesizliğini daha dengeli yansıtmak amacıyla makro ortalamalı F1-skoru ve makro ROC-AUC metrikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, filtreleme etkisinin veri yapısı ve model türüne bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle Wavelet tabanlı yaklaşım birçok modelde performansı koruyarak daha dengeli karar sınırları sunmuş, Hampel filtresi ise aykırı değerlere karşı kararlı sonuçlar üretmiştir. Buna karşılık, agresif yumuşatma tekniklerinin ayırt edici varyansı azaltabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, tabular sağlık verilerinde uygun filtre seçiminin model davranışını stabilize edebileceğini ve filtre–model uyumunun performans değerlendirmelerinde kritik bir değişken olduğunu deneysel olarak ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Gürültü giderme, Makine öğrenmesi, Sinyal işleme, Tabular veri, Veri ön işleme.*

Evaluating the Impact of Signal Processing Filters on Sleep Disorder Classification in Tabular Data

ABSTRACT

Sleep disorders pose a significant problem for both individual health and societal productivity. Although machine learning-based diagnostic systems have been widely studied in the literature, most studies have focused on developing model architectures and addressing class imbalance. In contrast, the effect of signal-processing-based filtering approaches on model behaviour in tabular health data, which lacks temporal dependencies, has been investigated to a limited extent. In this study, 12 filtering methods (Low-pass, Wavelet, Moving Average, EMA, Savitsky-Golay, LOESS, Spline, Kalman, Median, Hampel, Gaussian, and raw data) were systematically evaluated across multiple machine learning and deep learning models on the Sleep Health and Lifestyle dataset. Performance was evaluated using the macro-averaged F1-score and macro-ROC-AUC to reflect class imbalance better. The findings indicate that the filtering effect varies depending on the data structure and model type. Specifically, the Wavelet-based approach maintained performance across many models while offering more balanced decision boundaries, and the Hampel filter produced stable results against outliers. In contrast, aggressive smoothing techniques were observed to reduce discriminative variance. This study experimentally demonstrates that appropriate filter selection in tabular health data can stabilise model behaviour and that filter-model compatibility

Keywords: *Data preprocessing, Denoising, Machine learning, Signal processing, Tabular data.*

I. GİRİŞ

Metabolik homeostaz ve bilişsel süreçlerin devamlılığı, aktif bir nörobiyolojik süreç olan uykuya bağımlıdır. Ancak modern yaşam koşulları ve artan stres faktörleri, uyku bozukluklarını küresel bir halk sağlığı krizine dönüştürmüştür. Uyku bozuklukları, bireysel yaşam kalitesini düşürmenin ötesinde küresel ölçekte ciddi bir ekonomik maliyet yaratmaktadır. NHIS 2020 verileri yetişkin nüfusun %14,5'inin kronik uyku sorunuyla mücadele ettiğini gösterirken [1], bu durumun makroekonomik yansımaları da ağırlaşmaktadır. Nitekim RAND Corporation, yetersiz uykunun önde gelen 5 OECD ülkesinde yıllık 680 milyar dolara ulaşan üretim kaybına yol açtığını raporlamıştır [2]. 2025 yılında Çin'de yapılan geniş çaplı çalışmada, Obstrüktif Uyku Apnesi (OSA) vakalarındaki belirgin artış, sorunun hem sağlık hem de ekonomi üzerindeki baskısının giderek derinleştiğini kanıtlar niteliktedir [3].

Uyku evrelerinin değerlendirilmesinde polisomnografi (PSG), AASM kılavuzlarına göre altın standart (gold standard) olarak kabul edilir. Bununla birlikte PSG'nin yüksek maliyetli uzman gereksinimi ve hastanın konforunu azaltan yapısı, klinik kullanımını sınırlandırmaktadır [4]. Frase ve arkadaşları PSG'nin uykuya bağlı solunum bozukluklarının tespitinde objektif bir yöntem olmasına rağmen, uyku bozukluklarının karakterizasyonunda sınırlı bir geçerliliğe sahip olduğunu raporlamıştır [5]. Bu durum, daha erişilebilir klinik ve yaşam tarzı verilerine dayalı otomatik tanı sistemlerine olan ilgiyi artırmaktadır.

Literatürde makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin uyku bozukluğunu sınıflandırmasında başarılı sonuçlar ürettiği birçok çalışma bulunmaktadır [6-12]. Bu çalışmaların büyük bölümü özellik seçimi ve veri dengeleme tekniklerine odaklanırken, tabular veri setlerinde bulunan gürültü ve aykırı değerlerin model performansı üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde incelenmiştir [9, 13-14].

Bu çalışma, zamansal yapı içermeyen tabular sağlık verilerine sinyal işleme tabanlı ön işleme uygulanabilirliğini incelemektedir. Hampel, Wavelet, Spline, Moving Average, Exponential Moving Average (EMA), Low-pass, Savitzky–Golay, Gaussian, Median, LOESS Kalman filtreleri ve ham veri senaryosu kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve bu yaklaşımların sınıflandırma performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar, sinyal işleme tabanlı filtrelerin etkinliğinin nelere bağlı olduğunu göstermektedir.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Uyku bozukluklarının sınıflandırılmasına yönelik literatürde bulunan çalışmaların büyük bölümü farklı makine öğrenmesi algoritmalarının performanslarını karşılaştırmaya odaklanmıştır [6, 9]. Gradient Boosting ve Ensemble tabanlı yöntemlerin, Random Forest ve Naive Bayes gibi modellere kıyasla daha kararlı sonuçlar ürettiği çeşitli çalışmalarda raporlanmıştır [6-7, 9]. Ancak bu çalışmaların çoğunda veri kalitesi ve gürültü problemleri ikincil planda ele alınmaktadır.

Sleep Health and Lifestyle veri setinde [15] sınıf dengesizliği literatürde yaygın bir problemdir. Bu sorunu gidermek amacıyla SMOTE gibi örnek çoğaltma teknikleri kullanılmıştır [8, 14, 16]. Ancak bu yaklaşımlar, gürültülü örneklerin de çoğaltılmasına yol açarak özellikle küçük ve tabular veri setlerinde aşırı uyum riskini artırabilmektedir.

Model başarısını artırmaya yönelik olarak PCA, PSO gibi özellik seçimi ve optimizasyon yöntemleri ile CNN ve LSTM tabanlı derin öğrenme yaklaşımları da daha önce yapılan çalışmalarda incelenmiştir [11, 17].

Genel olarak literatür; (i) model mimarisinin güçlendirilmesi, (ii) veri dengesizliğinin giderilmesi ve (iii) özellik seçimi eksenlerinde yoğunlaşmaktadır. Buna karşın, tabular sağlık verilerinde sinyal kalitesini artırmaya yönelik sinyal işleme tabanlı filtreleme yaklaşımları oldukça sınırlı düzeyde incelenmiştir. Bu çalışma, klasik sinyal işleme tabanlı filtreleme tekniklerini tabular uyku sağlığı verilerine sistematik biçimde uygulayarak literatürde yeterince incelenmemiş olan bu boşluğu ele almayı amaçlamaktadır.

III. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Kullanılan Veri Seti

Bu çalışmada Kaggle platformunda yayımlanan *Sleep Health and Lifestyle Dataset* kullanılmıştır. Veri seti, bireylerin uyku süresi, fiziksel aktivite düzeyi, stres seviyesi, kalp atış hızı, vücut kitle indeksi (BMI) ve benzeri sağlık göstergelerine ilişkin öznitelikleri içermektedir. Veri seti toplam 374 örnek ve 13 öznitelikten oluşmaktadır. Hedef değişken, uyku bozukluğu durumunu temsil eden çok sınıflı bir kategorik değişkendir (None, Insomnia, Sleep Apnea) [15].

B. Kullanılan Kütüphaneler ve Programlar

Bu çalışmada tüm ön işleme, modelleme ve performans değerlendirme adımları Python tabanlı bir deneysel ortamda yürütülmüştür. Veri işleme ve analiz süreçlerinde Pandas ve NumPy; makine öğrenmesi modelleri için Scikit-learn, XGBoost ve LightGBM; derin öğrenme mimarileri için TensorFlow/Keras; görselleştirme işlemleri için ise Matplotlib ve Seaborn kütüphaneleri kullanılmıştır [18-26].

C. Uygulanan Gürültü Giderme Filtreleri

Bu çalışmada, tabular veri üzerinde farklı sinyal işleme tabanlı filtreleme yöntemleri uygulanmıştır. Toplamda 11 farklı filtreleme tekniği ve bir filtresiz kontrol durumu (None) değerlendirilmiştir. Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

Low-pass (Butterworth) filtresi kapsamında 2. dereceden düşük geçiren filtre kullanılmış, kesim frekansı 0.1 olarak belirlenmiş ve filtreleme işlemi *filtfilt* yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Wavelet tabanlı gürültü giderme yaklaşımında Daubechies 4 (db4) ana dalgacığı tercih edilmiş, ayrıştırma seviyesi 2 olarak seçilmiş ve soft thresholding uygulanmıştır. Moving Average yöntemi pencere genişliği 5 olacak şekilde merkezli kayan ortalama olarak uygulanmış, Exponential Moving Average (EMA) yöntemi ise $\alpha = 0.3$ parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Savitzky–Golay filtresi pencere uzunluğu 9 ve polinom derecesi 3 olacak biçimde uygulanmıştır. LOESS (LOWESS) yöntemi yerel ağırlıklı regresyon yaklaşımı ile, frac parametresi 0.1 olacak şekilde kullanılmıştır. Spline yumuşatma yöntemi sürekli öznitelikler üzerinde Univariate Spline yaklaşımı ile gerçekleştirilmiş ve düzgünlük parametresi veri uzunluğu ile orantılı olarak belirlenmiştir. Kalman filtresi tek boyutlu basit bir yapı ile uygulanmış, süreç varyansı 1e-5 ve ölçüm varyansı 0.1 olarak alınmıştır. Median filtresi 5 örnek genişliğinde uygulanmıştır. Hampel filtresi pencere genişliği $W = 5$ ve eşik değeri 3σ olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Gaussian filtresi ise $\sigma = 2$ parametresi ile tek boyutlu olarak uygulanmıştır. Filtreleme uygulanmayan ham veri durumu kontrol senaryosu (None) olarak değerlendirilmiştir. Tüm filtreleme işlemleri her bir öznitelik sütunu üzerinde ayrı ayrı uygulanmıştır.

D. Sınıflandırma Modelleri ve Deneysel Kurulum

Klasik ve sığ öğrenme modelleri olarak Decision Tree (DT), Gaussian Naive Bayes (GNB), Logistic Regression (LR), Support Vector Machine (SVM) ve Multi-Layer Perceptron (MLP) değerlendirilmiştir. DT modeli varsayılan parametrelerle, GNB olasılıksal bağımsızlık varsayımı altında, LR ve MLP modelleri *max_iter = 2000* ile, SVM modeli ise RBF çekirdeği (*kernel = rbf*) ve olasılık çıktıları aktif edilerek (*probability = true*) eğitilmiştir. MLP modeli iki gizli katmanlı (64, 32) mimariye sahiptir.

Topluluk öğrenme modelleri kapsamında Random Forest (300 ağaç), XGBoost (*learning_rate = 0.05, max_depth = 4, n_estimators = 400*), LightGBM (XGBoost ile karşılaştırılabilir karmaşıklıkta) ve Logistic Regression, SVM ve Random Forest modellerinin soft voting ile birleştirildiği Voting Classifier kullanılmıştır.

Derin öğrenme modelleri olarak 1D-CNN ve LSTM mimarileri değerlendirilmiştir. 1D-CNN modeli 64 filtreli Conv1D (*kernel_size = 2*), MaxPooling (*pool_size = 2*), 50 nöronlu tam bağlı katman ve Softmax çıkıştan oluşmaktadır. LSTM modeli ise 50 üniteli tek yönlü LSTM katmanı ve %20 Dropout içermektedir. Her iki model de Adam optimizasyonu (*learning_rate = 0.001*) ile 50 epoch ve 32 mini-batch boyutu kullanılarak eğitilmiştir.

IV. SONUÇLAR

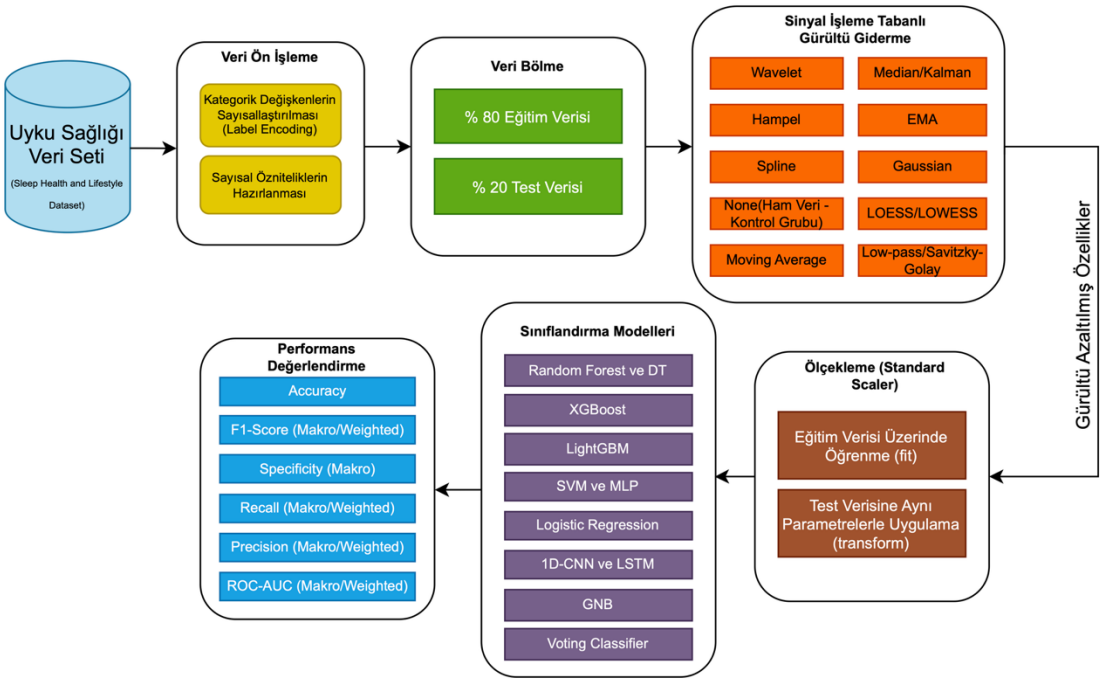
A. Çalışmanın Genel Metodolojik Akışı

Bu çalışmada kullanılan veri seti, sinyal işleme tabanlı ön işleme yaklaşımı ve sınıflandırma süreci Şekil 1'de özetlenmiştir. Sleep Health and Lifestyle veri setinin elde edilmesiyle başlamaktadır. Kategorik değişkenler etiket kodlama (Label Encoding) ile sayısal forma dönüştürülmüş, sayısal değişkenler doğrudan modele girdi olarak kullanılmıştır.

Veri seti, sınıf dağılımı korunacak şekilde %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmış; tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla sabit bir rastgelelik tohumu kullanılmıştır. Eğitim ve test kümeleri oluşturulduktan sonra, sinyal işleme tabanlı gürültü giderme adımları her bir alt küme üzerinde ayrı ayrı uygulanarak veri sızıntısı (data leakage) engellenmiştir.

Çalışma kapsamında Low-pass (Butterworth), Dalgacık (Wavelet) dönüşümü, Moving Average, Exponential Moving Average (EMA), Savitzky–Golay, LOESS (LOWESS), Spline tabanlı yumuşatma, Kalman, Median, Hampel ve Gaussian filtreleme yöntemleri uygulanmış; filtreleme uygulanmayan ham veri durumu kontrol senaryosu (None) olarak değerlendirilmiştir. Filtreleme adımı, öznitelik üretiminden ziyade mevcut özniteliklerdeki gürültünün bastırılması amacıyla uygulanmış olup sonraki adımda öznitelikler standartlaştırma (Standard Scaler) yöntemi ile ölçeklendirilmiştir.

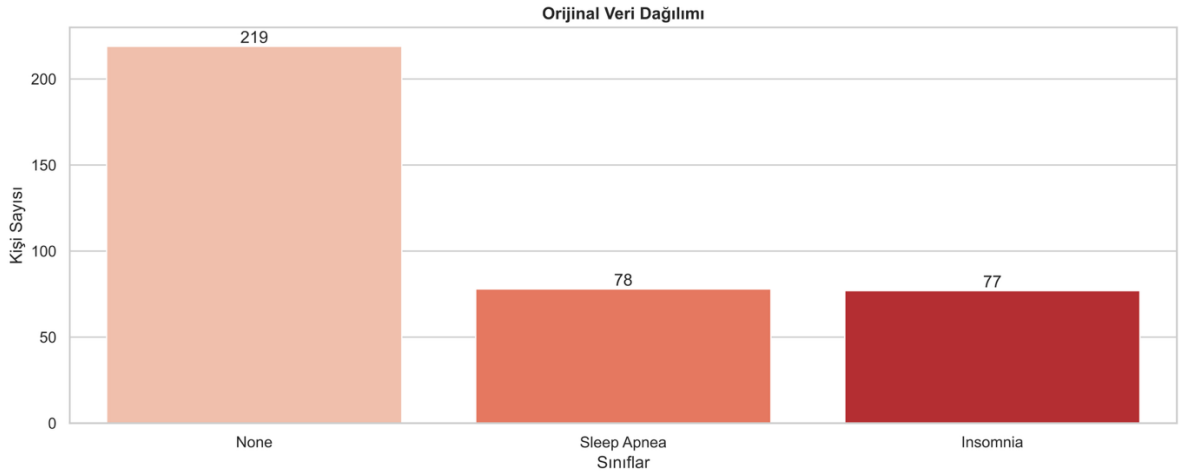
Son aşamada Random Forest, Decision Tree, Gaussian Naive Bayes, XGBoost, LightGBM, SVM, MLP, Multinomial Logistic Regression, Voting Classifier ile 1D-CNN ve LSTM modelleri kullanılarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Model performansları doğruluk, F1-makro, duyarlılık, özgüllük ve ROC-AUC metrikleri üzerinden değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Önerilen sinyal işleme tabanlı sınıflandırma akışı.

B. *Veri Seti Tanımı*

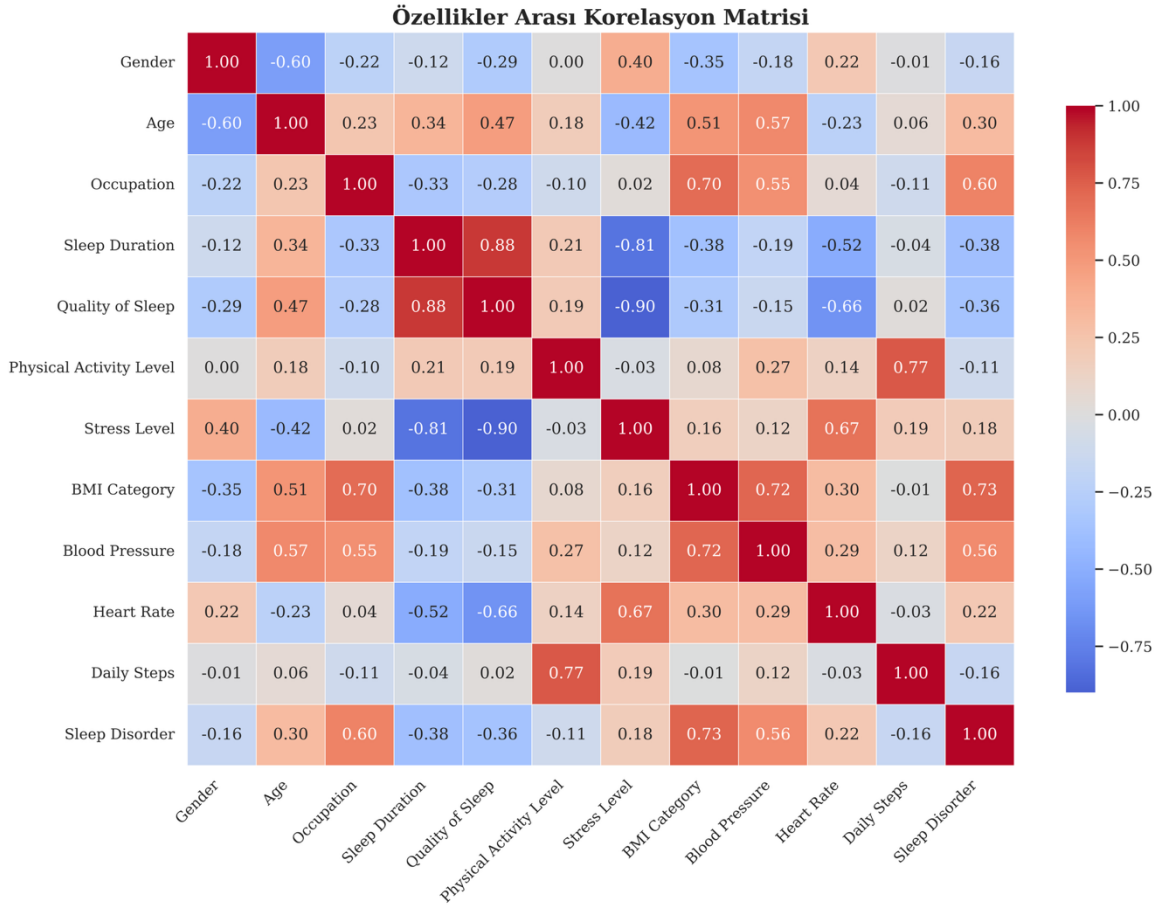
Veri setine ilişkin sınıf dağılımı Şekil 2'de sunulmaktadır. Hedef değişken üç sınıftan (None, Insomnia ve Sleep Apnea) oluşmaktadır. Sınıf dağılımı incelendiğinde, sağlıklı bireylerin diğer sınıflara kıyasla daha yüksek temsil oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, performans değerlendirmesinde sınıf bazlı ölçütlerin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Veri setinde eksik değer bulunmadığından, tüm örnekler doğrudan analiz sürecine dahil edilmiştir



Şekil 2. Sleep Health and Lifestyle veri setinde yer alan uyku durumu sınıflarının (None, Sleep Apnea, Insomnia) örnek sayıları bakımından dağılımı.

C. *Keşifsel Veri Analizi (Exploratory Data Analysis)*

Veri setindeki özniteliklerin arasındaki doğrusal ilişkileri incelemek ve verinin yapısal karakteristiğine dair ön bir değerlendirme yapmak amacıyla Pearson korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen korelasyon matrisi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Öznitelikler arasındaki Pearson korelasyon matrisi.

Analiz sonuçları, bazı öznitelikler arasında belirgin pozitif ve negatif doğrusal ilişkiler bulunduğunu göstermektedir. Özellikle fizyolojik ölçümler (örneğin kalp atış hızı, stres seviyesi ve kan basıncı gibi değişkenler) arasında orta ve yüksek düzeyde korelasyonlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm öznitelik seti genel olarak değerlendirildiğinde bu ilişkilerin homojen ve güçlü bir yapı oluşturmadığı, korelasyonların belirli değişken çiftleriyle sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, veri setinin küresel ölçekte belirgin bir sinyal benzeri yapı sergilemediğine, daha çok parçalı ve değişkenler arası sınırlı bağımlılıklar içerdiğine işaret etmektedir. Dolayısıyla sinyal işleme tabanlı filtreleme yöntemlerinin sınıflandırma performansı üzerindeki etkisinin veri genelinde sınırlı kalmasının nedenlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Korelasyon analizi yalnızca keşifsel amaçla kullanılmış olup, herhangi bir öznitelik eleme işlemi uygulanmamıştır.

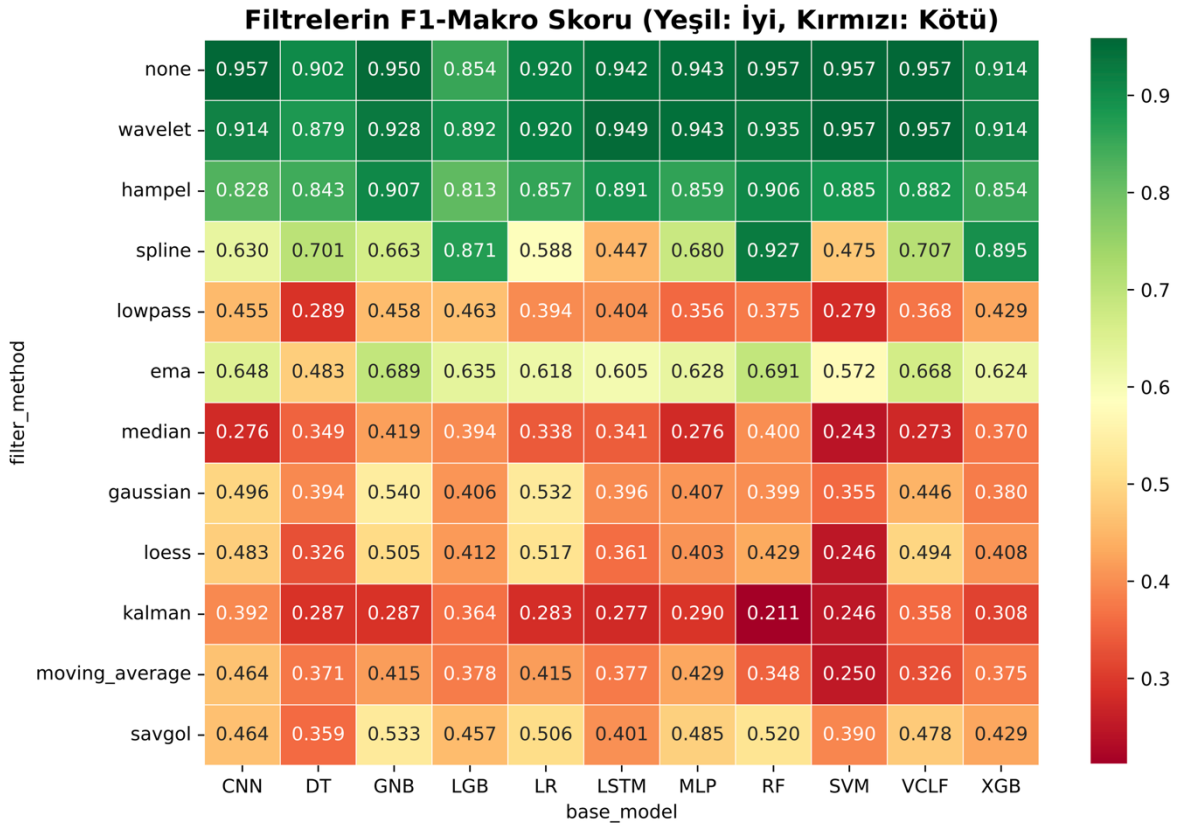
D. Deneysel Değerlendirme Stratejisi

Model performansları; Doğruluk (Accuracy), F1-Skoru (Makro ve Weighted), Kesinlik (Precision), Özgüllük (Specificity) ve ROC-AUC (Makro ve Weighted) metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sınıflar arasındaki örnek sayısı dengesizliklerinin etkisini daha sağlıklı biçimde yansıtabilmek amacıyla, sonuçların yorumlanmasında makro ortalamalı metrikler öncelikli olarak raporlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar doğruluk, F1-skoru ve ROC-AUC metrikleri üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Veri setindeki sınıf dağılımı dengesizliği nedeniyle doğruluk metriğinin baskın sınıf lehine yanıltıcı olabileceği göz önünde bulundurulmuş; bu nedenle filtreleme yaklaşımlarının özellikle azınlık sınıflar üzerindeki etkisini daha dengeli yansıtabilmek amacıyla F1-makro skoru ve makro ortalamalı ROC-AUC (one-vs-rest) metrikleri ana değerlendirme kriterleri olarak tercih edilmiştir [6]

E. Genel Filtreleme Etkisinin Karşılaştırılması (F1-makro)

Şekil 4'te gösterilen ısı haritası sonuçları incelendiğinde, ham veri (None) senaryosunun birçok modelde en yüksek veya en yüksek değerlere oldukça yakın macro F1-skoru ürettiği görülmektedir. Özellikle CNN, Random Forest, SVM ve Voting Classifier modellerinde filtreleme uygulanmadan elde edilen sonuçlar en üst düzeydedir. Bu sonuç, veri setinin başlangıçta yüksek düzeyde gürültü içermediğini ve agresif yumuşatma işlemlerinin ayırt edici varyansı azaltabildiğini göstermektedir.



Şekil 4. Filtre–model kombinasyonlarına ait makro F1-skoru sonuçları.

Wavelet filtresi, bazı modellerde performansı büyük ölçüde koruyarak ham veri (None) senaryosuna oldukça yakın F1-makro skorları üretmiştir. Benzer şekilde Hampel filtresi de özellikle bazı istatistiksel ve topluluk temelli modellerde kabul edilebilir ve görece kararlı sonuçlar sunmuştur. Bununla birlikte, ısı haritası genel olarak incelendiğinde filtreleme yöntemlerinin tüm modeller için tutarlı bir performans artışı sağlamadığı, aksine birçok modelde belirgin performans düşüşlerine yol açtığı görülmektedir. Özellikle agresif yumuşatma içeren yöntemlerde bu düşüş daha belirgindir.

Bu bulgular, filtrelemenin gereksiz olduğu anlamına gelmemekle birlikte, etkisinin model ve yöntem bağımlı olduğunu göstermektedir. Nitekim bazı model–filtre kombinasyonlarında (özellikle Wavelet ve kısmen Hampel) performans korunurken, diğer birçok durumda filtreleme işlemi ayırt edici bilgiyi zayıflatarak sınıflandırma başarımını olumsuz etkileyebilmektedir.

Filtreleme yöntemlerinin ortalama macro F1 performansları Tablo 1'de sunulmuştur. Ortalama değerlere göre ham veri (None) ve Wavelet filtresi en yüksek performansları üretmiştir (None: 0.932, Wavelet: 0.926). Bununla birlikte, model bazlı dağılım dikkate alındığında Wavelet filtresinin daha homojen bir performans profili sunduğu görülmektedir.

Tablo 1. Filtreleme yöntemlerinin ortalama F1-makro performansları.

Filtrelemeler	**Ortalama F1-makro**	**Standart Sapma**
None	0.932	0.03
Wavelet	0.926	0.03
Hampel	0.866	0.03
Spline	0.689	0.16
EMA	0.624	0.06
Savitzky-Golay	0.457	0.06
Gaussian	0.432	0.06
LOESS	0.417	0.08
Low-pass	0.388	0.06

Moving Average	0.377	0.06
Median	0.334	0.06
Kalman	0.300	0.05

Kalman ve Moving Average gibi yöntemlerde gözlenen belirgin performans düşüşü, bu filtrelerin tasarım varsayımları ile veri setinin yapısal özellikleri arasındaki uyumsuzlukla açıklanabilir. Kalman filtresi, süreç ve ölçüm gürültüsünün zamansal olarak modellenebildiği dinamik sistemler için geliştirilmiştir; ancak bu çalışmada kullanılan veri seti zamansal bağımlılık içermeyen, gözlemler arası bağımsız ve özdeş dağılmış varsayımına daha yakın bir tabular yapıdadır. Benzer şekilde Moving Average ve benzeri yumuşatma teknikleri, yüksek frekanslı bileşenleri bastırırken sınıflar arası karar sınırlarını belirleyen ince varyasyonları da zayıflatabilmektedir. Bu durum özellikle sınıflar arası ayrımın ince öznitelik farklılıklarına dayandığı tabular veri yapılarında performans kaybına yol açabilmektedir.

Tablo 2'de seçili filtrelerin model bazlı sonuçları verilmiştir. Wavelet dönüşümü, SVM, Random Forest, Voting Classifier ve XGBoost modellerinde performansı büyük ölçüde korurken, LightGBM modelinde F1-makro skorunu artırmıştır. Hampel filtresi ise aykırı değerlere duyarlı modellerde kararlı sonuçlar üretmiştir. Buna karşılık Spline ve diğer agresif yumuşatma teknikleri birçok modelde performans düşüşüne neden olmuştur.

Tablo 2. Sinyal İşleme Tabanlı Filtreleme Yöntemleri ile Model Bazlı F1-makro Performansları

Filtre/Model	**CNN**	**DT**	**GNB**	**LGB**	**LR**	**LSTM**	**MLP**	**RF**	**SVM**	**VCLF**	**XGB**
None	0.957	0.902	0.950	0.854	0.920	0.942	0.943	0.957	0.957	0.957	0.914
Wavelet	0.914	0.879	0.928	0.892	0.920	0.949	0.943	0.935	0.957	0.957	0.914
Hampel	0.849	0.843	0.907	0.813	0.857	0.902	0.859	0.906	0.885	0.882	0.854
Spline	0.539	0.701	0.663	0.871	0.588	0.590	0.680	0.927	0.475	0.707	0.895

Genel olarak değerlendirildiğinde, tabular ve zamansal bağımlılık içermeyen veri yapısında filtreleme yöntemleri evrensel bir performans artışı sağlamamaktadır. Bununla birlikte, filtreleme uygulanacaksa Wavelet filtresi öncelikli, Hampel filtresi ise koşullu bir alternatif olarak önerilebilir.

E. Doğruluk (Accuracy)

Sleep Health and Lifestyle veri seti üzerinde yapılan birçok çalışmada model performansı ağırlıklı olarak doğruluk (accuracy) metriği üzerinden raporlanmıştır [6, 16]. Ancak sınıf dağılımının dengesiz olduğu çok sınıflı sağlık veri setlerinde accuracy (doğruluk) metriğinin baskın sınıf lehine yanıltıcı sonuçlar üretebildiği bilinmektedir.

Accuracy metriğinin doygunluk eğilimini göstermek amacıyla, ortalama F1-makro skoruna göre en yüksek performans gösteren ilk 6 model seçilmiş ve None ile Wavelet senaryolarındaki sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. F1-makro performansına göre en iyi 6 model için Accuracy, Precision, Recall ve Specificity sonuçları (None ve Wavelet).

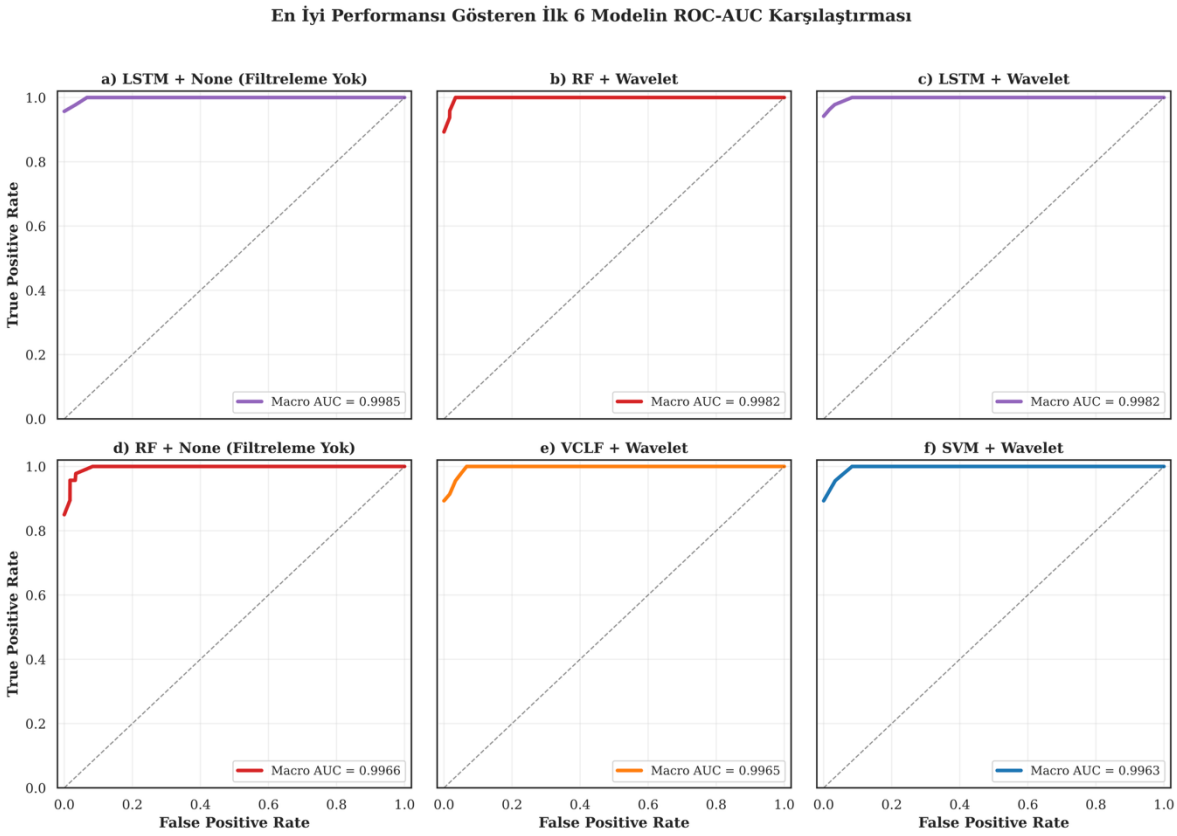
Model + Filtre	**Doğruluk (Accuracy)**	**Kesinlik (Precision)**	**Duyarlılık (Recall)**	**Özgüllük (Specificity)**
RF + None	97.33%	95.69%	95.69%	98.88%
SVM + Wavelet	97.33%	96.30%	95.56%	98.87%
SVM + None	97.33%	96.30%	95.56%	98.87%
CNN + None	97.33%	96.30%	95.56%	98.87%
VCLF + None	97.33%	96.30%	95.56%	98.87%
VCLF + Wavelet	97.33%	96.30%	95.56%	98.87%

Tablo 3 incelendiğinde, seçili modellerin tamamında doğruluk değerlerinin %97,33 seviyesinde doygunluğa ulaştığı ve filtreleme senaryoları arasında belirgin bir ayrışma göstermediği görülmektedir. Bu durum, doğruluk metriğinin ön işleme stratejilerinin etkisini ayırt etmede sınırlı kaldığını ve filtreleme

yaklaşımlarının katkısının sınıf-duyarlı metrikler (F1-makro ve ROC-AUC) üzerinden daha anlamlı biçimde değerlendirilebileceğini göstermektedir.

F. G. ROC-AUC

ROC-AUC analizi, modellerin sınıflar arası ayırt edicilik kapasitesini, belirli bir eşik değerinden bağımsız olarak değerlendirmesi nedeniyle, dengesiz çok sınıflı sağlık veri setlerinde kritik bir ölçüttür. Bu kapsamda, Şekil 6'da en yüksek performansı gösteren ilk altı model için makro-ortalama ROC-AUC eğrileri sunulmuştur.



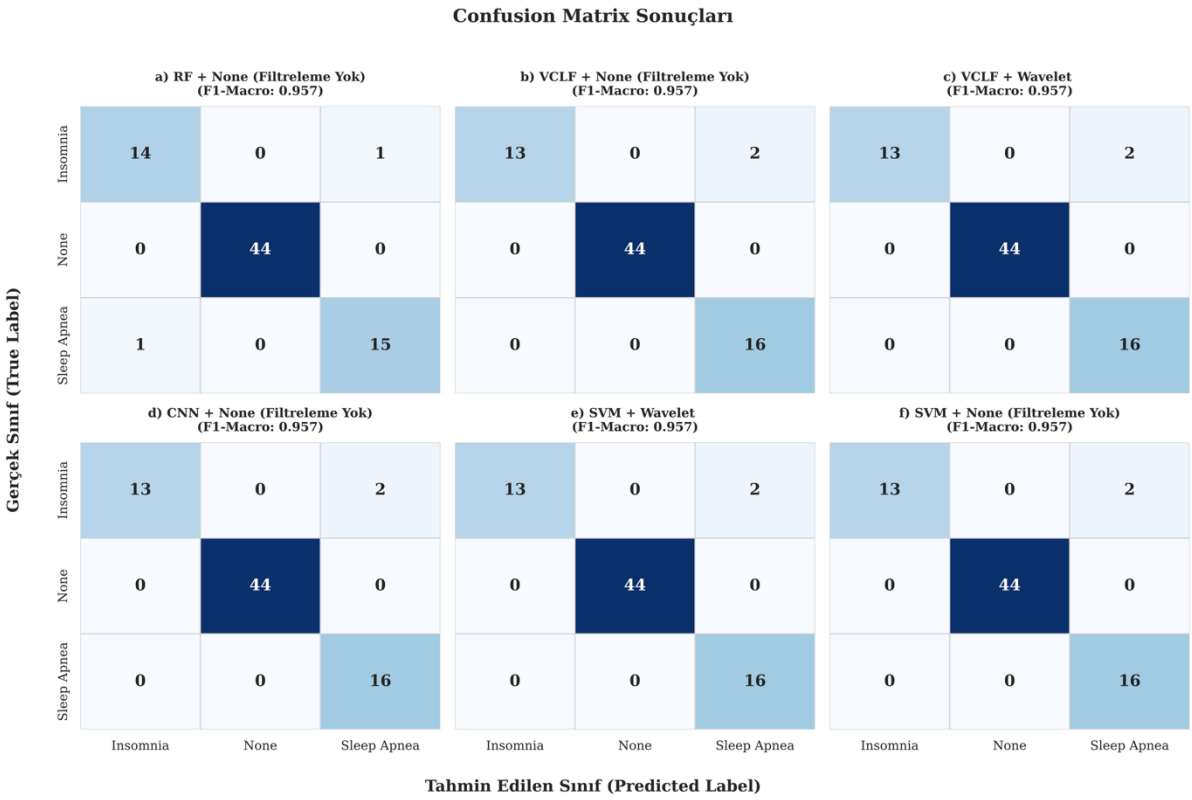
Şekil 6. En iyi altı model için makro-ortalama ROC-AUC eğrileri. Wavelet tabanlı filtreleme (RF, VCLF, SVM, LSTM) ve filtreleme uygulanmayan referans senaryolar (RF + None, LSTM + None) karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Şekil 6 incelendiğinde hem Wavelet modellerin hem de ham veri senaryolarında ROC-AUC değerlerinin 0.99 seviyesine oldukça yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, doğruluk metriğinde gözlenen doygunluğa rağmen, modellerin yüksek ayırt edicilik kapasitesini koruduğunu göstermektedir. Wavelet tabanlı filtreleme uygulanan SVM, VCLF ve LSTM modellerinde ROC eğrilerinin daha düzgün ve köşeye yakın seyretmesi, filtrelemenin performansı artırmaktan ziyade karar sınırlarında kararlılık sağladığını düşündürmektedir. Buna karşılık, ham veri üzerinde yüksek performans sergileyen RF ve LSTM modellerinde daha keskin eğriler gözlemlenmiştir.

ROC-AUC eğrileri sınıflar arası ayrımı genel düzeyde ortaya koymakla birlikte, hata dağılımının sınıf bazlı analizini sağlamamaktadır. Bu nedenle bir sonraki bölümde Confusion Matrix analizi sunulmuştur.

G. Confusion Matrix

Şekil 7'de, en yüksek F1-makro performansını gösteren seçili modeller için elde edilen Confusion Matrix sonuçları sunulmaktadır. Filtreleme uygulanmayan (None) ve Wavelet tabanlı filtreleme senaryoları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. F1-makro skoruna göre en yüksek performans gösteren modeller için Confusion Matrix sonuçları.

Tüm modellerde baskın sınıf olan **None** kategorisinin hatasız ya da hataya çok yakın düzeyde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu durum, accuracy metriğinde gözlenen doygunluğu açıklamaktadır. Azınlık sınıflar olan **Insomnia** ve **Sleep Apnea** arasındaki yanlış sınıflandırmalar sınırlı sayıda olup, hatalar büyük ölçüde bu iki sınıf arasında yoğunlaşmaktadır. Bu durum, sınıfların özellik uzayında kısmi örtüşme gösterdiğine işaret etmektedir.

Wavelet tabanlı filtreleme uygulanan modellerde hata dağılımının daha dengeli ve simetrik olduğu; ancak toplam hata sayısında dramatik bir azalma olmadığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, filtreleme uygulanmayan bazı güçlü modellerde karar sınırlarının daha keskin olduğu görülmektedir.

Genel olarak Confusion Matrix analizi, Wavelet tabanlı filtrelemenin ortalama performansı belirgin biçimde artırmadığını; ancak azınlık sınıflar arasındaki hata dağılımını daha dengeli hâle getirdiğini göstermektedir. Bu bulgular, F1-makro ve ROC-AUC analizleri ile tutarlıdır.

V. TARTIŞMA

A. Filtreleme Yaklaşımının Veri Yapısına Bağlı Etkisi

Elde edilen sonuçlar, Tablo 1 ve Şekil 4'te görüldüğü üzere, zamansal bağımlılık içermeyen tabular sağlık verilerinde sinyal işleme tabanlı filtreleme yöntemlerinin filtreleme katkısının veri yapısına duyarlı olduğunu ve performans artışının koşula bağlı gerçekleştiğini göstermektedir. Ham veri (None) senaryosunun birçok modelde en yüksek veya en yüksek değerlere oldukça yakın F1-makro skorları üretmesi, veri setinin belirgin bir rastgele gürültü yapısına sahip olmadığını düşündürmektedir. Şekil 3'te gösterilen Pearson korelasyon analizinde gözlenen zayıf ve dağınık ilişkiler, verinin güçlü bir sinyal karakteristiği taşımadığını desteklemektedir.

Literatürde, giyilebilir sensörler ve öz-bildirim verileri üzerinde yapılan çalışmalar, model performansının yalnızca zamansal dinamiklere değil veri kalitesi ve ölçüm güvenilirliği gibi faktörlere de bağlı olabileceğini göstermektedir [12]. Ayrıca, denoising tabanlı yaklaşımların zamansal seri varsayımı olmaksızın tabular veriler üzerinde de uygulanabildiği raporlanmıştır [27]. Bununla birlikte, çalışmamızda elde edilen bulgular, filtreleme katkısının veri yapısına duyarlı olduğunu ve her tabular veri setinde anlamlı bir performans artışı üretmeyebileceğini ortaya koymaktadır. Bu veri setinde sınıflandırma başarımının ölçüm gürültüsünden ziyade özniteliklerin yapısal ayrım gücüne dayandığı anlaşılmaktadır.

B. *Filtreler Arasında Karşılaştırmalı Değerlendirme*

Tablo 1 ve 2 incelendiğinde filtreler arasında Wavelet dönüşümü, ortalama performansı artırmaktan çok model davranışını koruyan ve daha dengeli sonuçlar sunan yöntem olarak öne çıkmıştır. Özellikle SVM, Random Forest ve Voting Classifier modellerinde Wavelet filtresi, ham veri senaryosuna oldukça yakın F1-makro ve ROC-AUC değerleri üretmiş olup bu duurum Şekil 6'da açıkça belirtilmektedir. Şekil 7'de gösterilen ROC eğrilerinin daha düzgün seyretmesi ve Confusion Matrix analizinde hata dağılımının daha simetrik olması, Wavelet yaklaşımının karar sınırlarında istikrar sağlayabileceğini düşündürmektedir.

Wavelet tabanlı gürültü giderme yöntemlerinin makine öğrenmesi ile kullanıldığı çalışmalar, özellikle sinyal yapısının belirgin olduğu biyomedikal uygulamalarda performans artışı bildirmiştir [28]. Bununla birlikte yöntemin başarımı kullanılan dalgacık türü ve eşikleme stratejilerine duyarlıdır [29]. Çalışmamızda zamansal bağımlılık içermeyen tabular veri yapısında Wavelet yaklaşımı, performansı düşürmeden karar davranışını stabilize eden ve model–filtre uyumunu en dengeli biçimde sağlayan yöntem olarak öne çıkmıştır. Bu durum, Wavelet'in etkinliğinin veri yapısına bağlı olduğunu göstermektedir.

Hampel filtresi, median ve Median Absolute Deviation (MAD) temelli sağlam yapısı sayesinde aykırı gözlemleri veri dağılımını bozmadan bastırabilen bir yöntemdir [30]. Literatürde biyomedikal sinyallerde ani ölçüm sapmalarının giderilmesinde etkin biçimde kullanıldığı raporlanmıştır [31-32] Tablo 1'deki performans sonuçlarına göre Hampel filtresi ortalama performans açısından Wavelet'in gerisinde kalmış olsa da Tablo 2'deki verilere göre bazı modellerde istikrarlı ve kabul edilebilir sonuçlar üretmiştir. Bu durum, aykırı değerlerin baskın olduğu veri yapılarında Hampel filtresinin koşullu bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Buna karşılık olarak Tablo 1 ve Tablo 2'deki çıkan sonuçlara göre Spline ve diğer güçlü yumuşatma tekniklerinin birçok modelde belirgin performans düşüşüne yol açması, aşırı yumuşatmanın ayırt edici varyansı azaltabileceğini göstermektedir. Literatürde penalize spline yöntemlerinin parametre hassasiyeti nedeniyle aşırı yumuşatma riski taşıdığı belirtilmektedir [33]. Bulgularımız bu teorik beklenti ile uyumludur.

Bu çerçevede, filtreleme uygulanacaksa Wavelet filtresi öncelikli, Hampel filtresi ise aykırı değer yoğun veri setlerinde koşullu bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

C. *Model–Filtre Uyumu ve Derin Öğrenme Modelleri*

Literatürde, Sleep Health and Lifestyle veri seti üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda ensemble yöntemlerin güçlü performans sergilediği raporlanmıştır [7, 11, 13] Özellikle Random Forest ve gradient boosting temelli yaklaşımlar dengesiz ve potansiyel olarak gürültülü sağlık verilerinde yüksek genelleme başarımı sunmaktadır [7, 11] Çalışmamızda da Random Forest, SVM ve Voting Classifier modelleri filtreleme uygulanmaksızın en yüksek F1-makro skorlarını üretmiştir (Tablo 2). Bu bulgu literatürle uyumludur ve güçlü karar sınırı öğrenme kapasitesine sahip modellerde ek gürültü bastırma adımının zorunlu olmadığını göstermektedir.

Son yıllarda tabular veriler zamansal yapı içermese dahi 1D-CNN ve LSTM gibi derin öğrenme mimarilerinin deneysel karşılaştırmalara dahil edildiği çalışmalar artmıştır [10, 17]. Ancak çalışmamızda, örnek sayısı sınırlı ve zamansal bağımlılık içermeyen bu veri yapısında derin öğrenme modelleri klasik makine öğrenmesi yöntemlerine belirgin bir üstünlük sağlayamamıştır (Tablo 2). Bu durum, derin öğrenme modellerinin avantajının veri hacmi ve yapısal bağımlılık özellikleri ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

D. *Genel Değerlendirme ve Pratik Çıkarım*

Accuracy metriğinde gözlenen doygunluk (Tablo 3), filtreleme senaryoları arasındaki farkların ayırt edilmesini zorlaştırmıştır. Buna karşılık F1-makro ve makro ROC-AUC metrikleri filtreleme etkisini daha dengeli biçimde ortaya koymuştur. Confusion Matrix analizinde (Şekil 7), Wavelet uygulanan modellerde hata dağılımının daha simetrik olduğu; ancak toplam hata sayısında dramatik bir azalma olmadığı görülmüştür.

Bu bulgular, filtrelemenin performans artışından ziyade model karar dağılımı üzerinde dengeleyici bir etki oluşturabileceğine işaret etmektedir. Zamansal bağımlılık içermeyen tabular sağlık verilerinde ölçüm gürültüsünün sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisi sınırlı kalmış; model performansı büyük ölçüde özniteliklerin yapısal ayrım gücü tarafından belirlenmiştir. Filtreleme stratejilerinin etkinliği, veri yapısı ve model mimarisi bağlamında değerlendirilmelidir.

VI. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Sleep Health and Lifestyle veri seti üzerinde sinyal işleme tabanlı gürültü giderme yöntemlerinin farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri üzerindeki etkileri sistematik biçimde analiz edilmiştir. Bulgular, filtreleme zorunlu görülen senaryolarda Wavelet tabanlı yaklaşımların

performansı koruma eğiliminde olduğunu; Hampel filtresinin ise aykırı değer içeren veri yapılarında alternatif bir ön işleme stratejisi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Çalışmanın temel katkısı, filtreleme işlemlerinin performans üzerindeki etkisinin veri yapısına ve model–veri uyumuna bağlı olduğunu deneysel olarak ortaya koymasıdır. Özellikle Wavelet ve Hampel yaklaşımları belirli senaryolarda model davranışını koruyucu etkiler sunmuştur. Bu sonuçlar, tabular sağlık verilerinde ön işleme stratejilerinin otomatik varsayımlarla değil, veri tipine özgü analizlerle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, daha büyük ve dengeli veri setleri üzerinde filtreleme etkisi yeniden test edilebilir. Ayrıca, zamansal yapı ve sensör temelli fizyolojik ölçümler içeren veri setlerinde sinyal işleme tabanlı yaklaşımların etkisi daha belirgin olabilir.

Bu çalışmada kullanılan filtreleme uygulamaları, veri ön işleme adımları ve model eğitim yapılandırmaları açık erişimli olarak paylaşılmıştır. Kod deposuna aşağıdaki bağlantıdan erişilebilir: https://github.com/MelihKotman/sleep-disorder-signal-processing

KAYNAKLAR

[1] D. Adjaye-Gbewonyo, A. E. Ng ve L. I. Black, "Sleep Difficulties in Adults: United States, 2020 Key findings Data from the National Health Interview Survey", Haz. 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.cdc.gov/nchs/products/index.htm.

[2] M. Hafner, M. Stepanek, J. Taylor, W. M. Troxel ve C. van Stolk, "Why Sleep Matters-The Economic Costs of Insufficient Sleep: A Cross-Country Comparative Analysis.", *Rand Health Q.*, c. 6, sy 4, s. 11, Oca. 2017.

[3] Y. Niu, S. Sun, Y. Wang, L. Chen, Y. Shao, ve X. Zhang, "Spatiotemporal Trends in the Prevalence of Obstructive Sleep Apnoea Across China: A Multilevel Meta-Analysis Incorporating Geographic and Demographic Stratification (2000-2024)", *Nat. Sci. Sleep*, c. Volume 17, ss. 879-903, May. 2025, doi: 10.2147/NSS.S525547.

[4] H. Almutairi, G. M. Hassan, ve A. Datta, "Machine-Learning-Based-Approaches for Sleep Stage Classification Utilising a Combination of Physiological Signals: A Systematic Review", *Applied Sciences*, c. 13, sy 24, s. 13280, Ara. 2023, doi: 10.3390/app132413280.

[5] L. Frase, C. Nissen, K. Spiegelhalder, ve B. Feige, "The importance and limitations of polysomnography in insomnia disorder—a critical appraisal", *J. Sleep Res.*, c. 32, sy 6, Ara. 2023, doi: 10.1111/jsr.14036.

[6] A. Taher ve W. I. Z. Ayon, "Exploring Sleep Disorders: A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms on Sleep Health and Lifestyle Data", içinde *2024 IEEE International Conference on Power, Electrical, Electronics and Industrial Applications (PEEIACON)*, IEEE, Eyl. 2024, ss. 71-75. doi: 10.1109/PEEIACON63629.2024.10800593.

[7] Md. A. Rahman *vd.*, "Improving Sleep Disorder Diagnosis Through Optimized Machine Learning Approaches", *IEEE Access*, c. 13, ss. 20989-21004, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3535535.

[8] T. O. Adeyemi, "Optimized Machine Learning Algorithms for the Classification and Diagnosis of Sleep Disorders", *medRxiv*, 2025, doi: 10.1101/2025.10.07.25337263.

[9] M. Kumar, B. Ahmed, H. M. Mishra, A. K. Jha, P. K. Sikarwal, ve S. Rampal, "Predictive Sleep Disorder Modelling: Using Machine Learning with Lifestyle and Sleep Health Data", içinde *2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI)*, IEEE, May. 2024, ss. 1-7. doi: 10.1109/ACCAI61061.2024.10602153.

[10] M. Bahrami ve M. Forouzanfar, "Sleep Apnea Detection From Single-Lead ECG: A Comprehensive Analysis of Machine Learning and Deep Learning Algorithms", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, c. 71, ss. 1-11, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3151947.

[11] M. Khan, Y. Singh, ve H. Bhardwaj, "Harnessing Machine Learning and Optimization Techniques for Identifying Risk Factor of Sleep Apnea by Exploring Sleep Health and Lifestyle Dataset", *Sleep Vigil.*, c. 9, sy 2, ss. 219-229, Tem. 2025, doi: 10.1007/s41782-025-00316-8.

[12] Y. Meng *vd.*, "A Machine Learning Approach to Classifying Self-Reported Health Status in a Cohort of Patients With Heart Disease Using Activity Tracker Data", *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, c. 24, sy 3, ss. 878-884, Mar. 2020, doi: 10.1109/JBHI.2019.2922178.

[13] E.-S. M. El-kenawy, A. Ibrahim, A. A. Abdelhamid, N. Khodadadi, L. Abualigah, ve M. M. Eid, "Predicting Sleep Disorders: Leveraging Sleep Health and Lifestyle Data with Dipper Throated Optimization Algorithm for Feature Selection and Logistic Regression for Classification", *Computational Journal of Mathematical and Statistical Sciences*, c. 3, sy 2, ss. 341-358, Kas. 2024, doi: 10.21608/cjmss.2024.290167.1053.

[14] A. Rahmatulloh, Y. I. Hasari, E. Haerani, I. Darmawan, R. Gunawan ve R. Rizal, "Classification of Sleep Disorders Based on Lifestyle using K-Nearest Neighbors Algorithm", içinde *2025 International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, IEEE, Tem. 2025, ss. 1-6. doi: 10.1109/ICoICT66265.2025.11192909.

[15] L. Tharmalingam, "Sleep Health and Lifestyle Dataset". Erişim: 26 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.kaggle.com/datasets/uom190346a/sleep-health-and-lifestyle-dataset

[16] M. Mostafa Monowar *vd.*, "Advanced sleep disorder detection using multi-layered ensemble learning and advanced data balancing techniques", *Front. Artif. Intell.*, c. 7, Oca. 2025, doi: 10.3389/frai.2024.1506770.

[17] C. V. Stephen ve T. Islam, "Lifestyle to Sleep Health: A CNN-LSTM Approach for Predicting Sleep Quality and Disorders", içinde *2024 International Conference on Intelligent Cybernetics Technology & Applications (ICICyTA)*, IEEE, Ara. 2024, ss. 1222-1227. doi: 10.1109/ICICYTA64807.2024.10912866.

[18] F. Chollet ve others, "Keras", 2015. Erişim: 26 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://keras.io

[19] G. Rossum, "Python", 1991.

[20] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python", 2010, ss. 56-61. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.

[21] P. Virtanen *vd.*, "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python", *Nat. Methods*, c. 17, sy 3, ss. 261-272, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.

[22] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment", *Comput. Sci. Eng.*, c. 9, sy 3, ss. 90-95, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.

[23] C. R. Harris *vd.*, "Array programming with NumPy", *Nature*, c. 585, sy 7825, ss. 357-362, Eyl. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.

[24] M. L. Waskom, "seaborn: statistical data visualization", *J. Open Source Softw.*, c. 6, sy 60, s. 3021, 2021, doi: 10.21105/joss.03021.

[25] Martín~Abadi *vd.*, "TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems", 2015. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.tensorflow.org/

[26] T. Chen ve C. Guestrin, "XGBoost", içinde *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, New York, NY, USA: ACM, Ağu. 2016, ss. 785-794. doi: 10.1145/2939672.2939785.
[27] Y. Wen, Y. Wang, K. Yi, J. Ke, ve Y. Shen, "Diffimpute: Tabular Data Imputation with Denoising Diffusion Probabilistic Model", içinde *2024 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, IEEE, Tem. 2024, ss. 1-6. doi: 10.1109/ICME57554.2024.10687685.
[28] S. Fu, Y. Wu, R. Wang, ve M. Mao, "A Bearing Fault Diagnosis Method Based on Wavelet Denoising and Machine Learning", *Applied Sciences*, c. 13, sy 10, s. 5936, May. 2023, doi: 10.3390/app13105936.
[29] C. Cai ve P. de B. Harrington, "Different Discrete Wavelet Transforms Applied to Denoising Analytical Data", *J. Chem. Inf. Comput. Sci.*, c. 38, sy 6, ss. 1161-1170, Kas. 1998, doi: 10.1021/ci980210j.
[30] M. Roos-Hoefgeest Toribio, A. Garnung Menéndez, S. Roos-Hoefgeest Toribio, ve I. Álvarez García, "A Novel Approach to Speed Up Hampel Filter for Outlier Detection", *Sensors*, c. 25, sy 11, s. 3319, May. 2025, doi: 10.3390/s25113319.
[31] S. Bhowmik, B. Jelfs, S. P. Arjunan, ve D. K. Kumar, "Outlier removal in facial surface electromyography through Hampel filtering technique", içinde *2017 IEEE Life Sciences Conference (LSC)*, IEEE, Ara. 2017, ss. 258-261. doi: 10.1109/LSC.2017.8268192.
[32] R. K. Pearson, Y. Neuvo, J. Astola, ve M. Gabbouj, "Generalized Hampel Filters", *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, c. 2016, sy 1, s. 87, Ara. 2016, doi: 10.1186/s13634-016-0383-6.
[33] T. Krivobokova ve G. Kauermann, "A Note on Penalized Spline Smoothing With Correlated Errors", *J. Am. Stat. Assoc.*, c. 102, sy 480, ss. 1328-1337, Ara. 2007, doi: 10.1198/016214507000000978.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Akıllı Katı Atık Ayrıştırma Sistemlerinin İncelenmesi

İsmail Güçlü[a], Bülent Aydemir[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, DÜBİT Laboratuvarı, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** ismail245535@ogr.duzce.edu.tr**

ÖZET

Artan nüfus, kentleşme ve tüketim alışkanlıkları, katı atık miktarının ciddi biçimde hızla artmasına neden olmaktadır. Dünya bankasının yayınladığı verilere göre gelecek 25 yıl içinde katı atık miktarı günümüze göre %70 oranında artması beklenmektedir. Bu artış, mevcut atık yönetim sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmekte ve daha verimli, izlenebilir ve otomatik sistemlere olan ihtiyacı artırmaktadır. Geleneksel katı atık ayrıştırma yöntemleri, yüksek iş gücü ihtiyacı, düşük verimlilik ve sınırlı izlenebilirlik gibi önemli dezavantajlar ile hizmet vermektedir. Mevcut sistemler çoğunlukla insan iş gücüne dayanmakta olup; düşük hız, yüksek hata oranı ve yüksek iş sağlığı riskleri içerirler. Gelişen teknoloji, endüstri 4.0 yaklaşımı, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (YZ), büyük veri analitiği, siber-fiziksel sistemler ve bulut bilişim gibi yenilikler sunmaktadır. Sensör teknolojisi ve diğer teknolojik gelişmeler atık ayrıştırma, işleme ve yönetme kademelerinde dijital dönüşümü mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, Endüstri 4.0 teknolojileri ile geliştirilen akıllı ayrıştırma sistemleri, atık yönetiminde dönüşüm sağlayan yenilikçi çözümler verilmiştir. Endüstri 4.0 çerçevesinde uzaktan izlenebilir ve yönetilebilir akıllı katı atık ayrıştırma sistemlerinin bileşenleri, çalışma prensipleri, avantajları ve uygulama alanları ele alınmaktadır. Ayrıca karşılaşılan teknik ve yönetsel zorluklar ile geleceğe yönelik öngörüler sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Katı atık, Atık ayrıştırma, Atık yönetimi.*

Investigation of Smart Solid Waste Separation Systems

İsmail Güçlü[a], Bülent Aydemir[b]*

[a]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronic Engineering, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronic Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** ismail245535@ogr.duzce.edu.tr**

ABSTRACT

Increasing population, urbanization, and consumption habits are causing a significant and rapid increase in the amount of solid waste. According to data published by the World Bank, the amount of solid waste is expected to increase by 70% in the next 25 years compared to today. This increase threatens the sustainability of existing waste management systems and increases the need for more efficient, traceable, and automated systems. Traditional solid waste separation methods operate with significant disadvantages such as high labor requirements, low efficiency, and limited traceability. Traditional systems mostly involve human labor, low speed, high error rate, and high occupational health risks. Developing technology offers innovations such as the Industry 4.0 approach, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), big data analytics, cyber-physical systems, and cloud computing. Sensor technology and other technological developments enable digital transformation in the waste separation, processing, and management stages. In this study, it presents innovative solutions that transform waste management through smart sorting systems developed with Industry 4.0 technologies. The components, operating principles, advantages, and application areas of remotely monitorable and manageable smart solid waste sorting systems within the framework of Industry 4.0 are discussed. Furthermore, the technical and managerial challenges encountered and future predictions are discussed.

Keywords: *Solid waste, Waste sorting, Waste management.*

I. GİRİŞ

Hızla artan küresel nüfus ve endüstriyel üretim, katı atık yönetimini dünya çapında acil ve karmaşık bir sorun haline getirmiştir. Geleneksel atık toplama ve ayrıştırma yöntemleri, düşük verimlilik, yüksek işletme maliyetleri ve sınırlı geri kazanım oranları nedeniyle sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmakta yetersiz kalmaktadır.

Malzeme Geri Kazanım Tesisleri, karışık veya ayrılmış malzemelerin girdisini kabul ederek atıkları ayırır. Bu tesislerdeki temel sorunlardan biri, manuel ve otomatik ayırma teknikleri arasındaki seçimdir. Geleneksel Malzeme Geri Kazanım Tesisleri, büyük miktarda malzeme işlenirken esas olarak manuel ayırmaya dayanır. Bu yöntem çok pahalı ve zaman alıcı olarak kabul edilir. Ayrıca, işgücü istihdamı söz konusu tesisler için önemli bir maliyet kalemi oluşturmaktadır; beş işçi için yıllık personel maliyeti, yaklaşık olarak bir milyon dolar değerindeki sermaye ekipmanın sabit varlığına eşdeğerdir [1].

II. MATERYAL METOT

Endüstri 4.0 kavramı ilk olarak üretim sektöründe ortaya çıkmış olsa da günümüzde çevre yönetimi, enerji ve atık yönetimi gibi alanlarda da yaygın biçimde uygulanmaktadır. Atık yönetimi bağlamında Endüstri 4.0, klasik lineer "topla–taşı–bertaraf et" yaklaşımının yerine veri odaklı, esnek ve sürdürülebilir sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Çoğunlukla manuel olarak gerçekleştirilen geleneksel atık ayırma yöntemleri, yalnızca yoğun emek ve zaman alıcı olmakla kalmayıp, aynı zamanda çalışanları tehlikeli maddelere maruz bırakmakta ve geri dönüştürülebilir malzemelerin tutarlı bir şekilde geri kazanılmasını sağlayamamaktadır [2]. Bu durum, özellikle düşük kaynaklı ortamların kısıtlamalarını karşılamak üzere tasarlanmış, yenilikçi, uygun maliyetli ve verimli atık ayırma ve geri dönüşüm sistemlerine olan acil ihtiyacı vurgulamaktadır.

Mikrodenetleyiciler, sensörler, makine öğrenme algoritmaları ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi bir dizi gelişmiş araç kullanan otomatik atık ayırma teknolojileri, bu zorlukların üstesinden gelmek için güçlü çözümler olarak ortaya çıkmıştır. Bu sistemler, ağırlık, renk, boyut ve tür gibi çeşitli faktörlere dayalı olarak atık malzemelerin gerçek zamanlı olarak tanımlanmasını, sınıflandırılmasını ve ayrılmasını sağlar [2]. Manuel ayırma yöntemlerine kıyasla, otomatik sistemler atık geri kazanımında daha yüksek hassasiyet, artan verim ve gelişmiş verimlilik göstererek, insan hatasını en aza indirirken geri dönüştürülmüş çıktıların kalitesini önemli ölçüde artırır [3]. Bu tür teknolojilerin atık yönetimi altyapısına entegrasyonu, döngüsel ekonominin daha geniş ilkelerini destekler ve kaynak geri kazanımını teşvik ederek, enerji tüketimini azaltarak ve kirliliği hafifleterek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunur [4].

Akıllı atık ayırma alanında son yıllarda kayda değer gelişmeler kaydedilmiştir. Örneğin, konveyör bantları ve akıllı görüntüleme teknolojisini kullanan sistemler, malzemeleri renklerine ve doğal özelliklerine göre ayırt ederek atıkları başarıyla ayırmıştır [5]. Ayrıca, makine öğrenimi algoritmalarının atık ayıklama robotlarına entegrasyonu, sınıflandırma doğruluğu ve uyarlanabilirlik açısından önemli iyileştirmelere yol açmıştır [3]. İlaveten, güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan atık ayıklama sistemlerinin geliştirilmesi, atık yönetimi uygulamalarının sürdürülebilirliğini daha da ileri taşımıştır [6].

Nesnelerin İnterneti (IoT) destekli çözümler, uzaktan izleme ve veri analitiği sağlayarak, gerçek zamanlı karar vermeyi, öngörücü bakımı ve genel sistem optimizasyonunu kolaylaştırarak bu alanda kritik katkılar sağladığını ortaya koymaktadır[3]. Bu teknolojik gelişmelere rağmen, özellikle düşük gelirli bölgelerde, otomatik atık ayırma sistemlerinin yaygın olarak uygulanması çeşitli ekonomik ve teknik zorluklar nedeniyle engellenmeye devam etmektedir. Yüksek başlangıç maliyetleri, teknik uzmanlık eksikliği ve bakım zorlukları, bu gelişmiş sistemlerin benimsenmesini kısıtlamaktadır [7]. Bu nedenle, küçük ölçekli kentsel ve yarı kentsel toplulukların ihtiyaçlarını karşılamak üzere özel olarak tasarlanmış hem güvenilir hem de otomatik, uygun maliyetli, ölçeklenebilir ve basit çözümlerin geliştirilmesine acil ihtiyaç duyulmaktadır [8].

Atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik konusundaki endişelerin artmasına rağmen, mevcut atık ayırma sistemleri, özellikle gelişmekte olan bölgelerde büyük ölçüde manuel, verimsiz ve maliyetli olmaya devam etmektedir. Mevcut otomatik çözümler genellikle yüksek sermaye yatırımı ve gelişmiş altyapı gerektirdiğinden, düşük gelirli topluluklar için erişilemez hale gelmektedir. Dahası, birçok sistem yerel atık bileşimlerine uyum sağlayamamakta ve karışık atık türlerini etkili bir şekilde ayıramamaktadır. Etkili ayırma ve geri dönüşüm için basit teknolojilerden yararlanan düşük maliyetli, ölçeklenebilir ve verimli otomatik atık ayırma sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışma, atık yönetimi uygulamalarını iyileştirmeyi, iş gücü bağımlılığını azaltmayı ve kaynak kısıtlı ortamlarda geri dönüşüm verimliliğini artırmayı amaçlayan uygun maliyetli, otomatik bir atık ayırma ve geri dönüşüm sistemi tasarlayıp üreterek bu boşluğu gidermektedir.

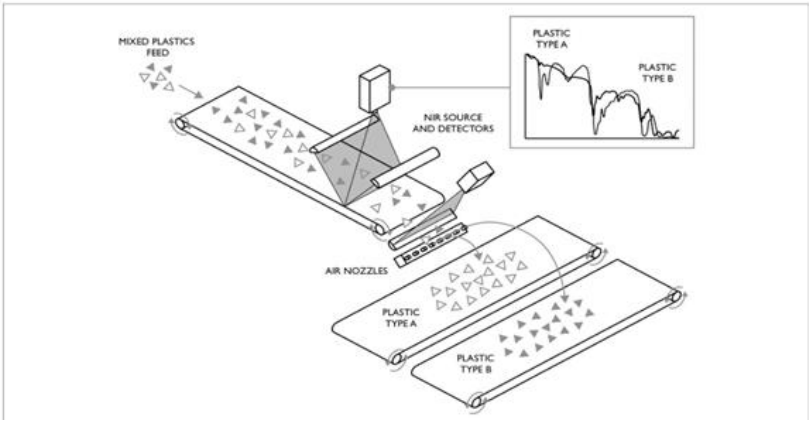
A. Akıllı Katı Atık Ayrıştırma Sistemlerinin Yapısı

Akıllı katı atık ayrıştırma sistemleri, genellikle 5 ana bileşenlerden oluşurlar. Bunlar aşağıda maddeler halinde ele alınmıştır.

a) Sensör ve Algılama Sistemleri

Optik sensörler, yakın kızılötesi (NIR) sensörler, manyetik sensörler ve ağırlık sensörleri kullanılarak atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri algılanır.

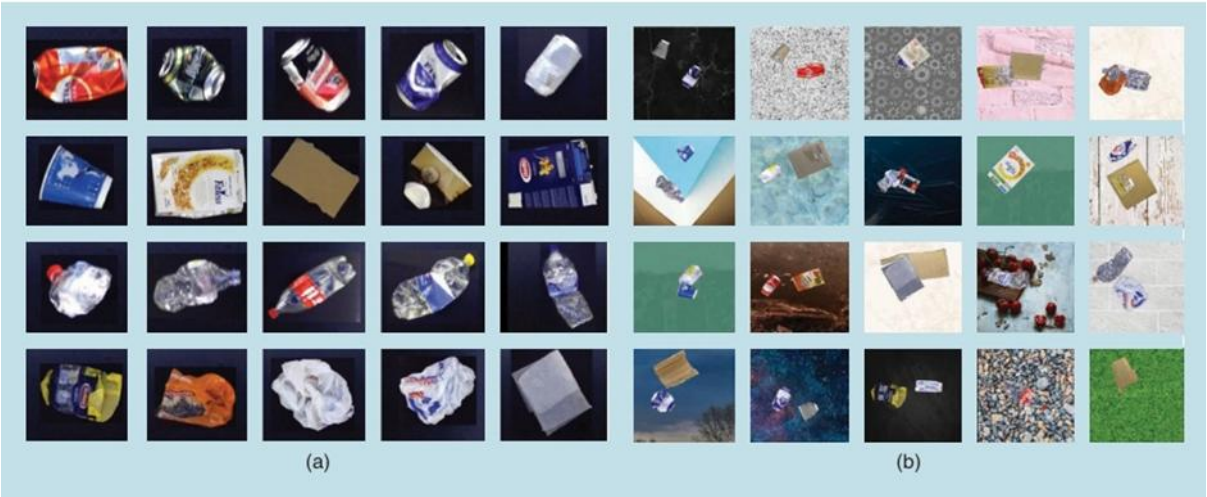
Şekil 1'de plastiklerin NIR Spektrumuna göre sınıflandırılması ile ilgili yapılmış bir çalışmanın çizimi yer almaktadır. Bu şekle göre siyah plastikler hava ile ayrılmaktadır. Bu yöntem sayesinde PLA plastiklerinin ayrıştırılması mümkün kılınmaktadır [9].



Şekil 9. Plastiklerin NIR spektrumları ve NIR plastik sınıflandırma ünitesinin şeması [9]

b) Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Modülleri

Kameralardan elde edilen görüntüler, derin öğrenme tabanlı algoritmalar yardımıyla analiz edilerek plastik, metal, cam ve organik atıklar gibi sınıflara ayrılır.



Şekil 10. (a) Her malzeme sınıfının temsillerini içeren temel veri seti (b) Genişletilmiş veri seti [5]

Şekil 2'de benzer işlemlerde özellikle başarılı olduğu bilinen Mask Regional CNN (R-CNN) açık kaynak ağı kullanılmış, görüntü işleme ile katı atık ayrıştırma sisteminin görüntülere göre ayırma tekniği verilmiştir. Görüntüye ve maskeye rastgele üç geometrik dönüşüm (öteleme, döndürme ve ölçekleme) uygulanmış ve siyah (konveyör bant) arka plana karşı tek nesneli görüntülerden oluşan büyük bir veri kümesiyle sonuçlandırılmış. İncelenen her malzeme sınıfının temsillerini içeren temel veri setinde alüminyum (birinci satır), kâğıt ve karton (ikinci satır), PET şişeler (üçüncü satır) ve naylon (dördüncü satır) olmak üzere ayrıştırılmıştır [5] [Şekil 2(a)]. Son olarak, ikinci adımdan rastgele seçilen nesne çiftleri (maskeleriyle birlikte) karmaşık problem örnekleri geliştirmek için renkli arka planlara sahip yeni görüntüler üzerine keyfi olarak yerleştirilmiştir. Geri dönüştürülebilir nesne veri toplama durumunda, bu adım, çeşitli arka planlar üzerinde birden fazla, muhtemelen örtüşen nesne içeren durumları inceleme olanağı sağlamıştır [5] [Şekil 2(b)].



Şekil 11. Montajı Yapılmış Düşük Maliyetli Otomatik Katı Atık Ayırma ve Geri Dönüşüm Sistemi [3]

c) Mekanik Ayrıştırma Birimleri

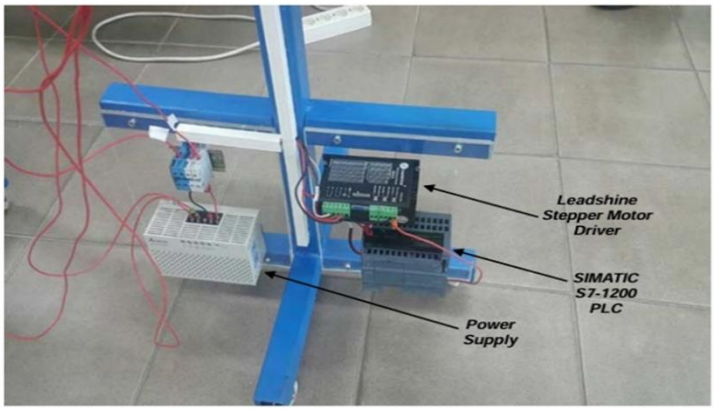
Pnömatik sistemler, robotik kollar ve konveyör bantlar yardımıyla tanımlanan atıklar ilgili haznelere yönlendirilir.

Şekil 3'te destek yapısı, yumuşak çelik borular ve köşebentlerin kesilip kaynaklanmasıyla inşa edilmiş, 12V DC motor ile çalışan Konveyör sistemi görülmektedir [3].

Büyük sistemlerde ön işlem ekipmanları olarak büyük atıkları daha küçük parçalara ayıran parçalayıcılar, sert malzemeleri ufalayan kırıcılar, çöp torbalarını otomatik olarak açan torba açıcılar bulunur. Bunun yanı sıra atıkları boyutlarına göre ayıran döner elekler, farklı tane boyutlarını sınıflandıran titreşimli elekler ve özellikle kâğıt, karton gibi malzemeleri ayırmada disk elekler kullanılır.

d) Haberleşme ve Kontrol Altyapısı

PLC, SCADA ve IoT tabanlı haberleşme protokolleri kullanılarak sistem bileşenleri arasında veri alışverişi sağlanır.



Şekil 12. Güç kaynağı, SIMATIC S7-1200 PLC ve Leadshine step motoru sürücüsü[1]

Şekil 4'te gösterilen Siemens SIMATIC S7-1200 PLC, bir mikroişlemci, entegre güç kaynağı, giriş ve çıkış devreleri, dahili PROFINET, yüksek hızlı hareket kontrol G/Ç ve yerleşik analog girişleri kompakt bir gövdede bir araya getirerek güçlü bir kontrolör oluşturan bir CPU1212C'den oluşur. CPU, cihazları izlemek ve yönetmek için mantıksal özelliklere sahiptir. Bu nedenle, kullanıcı programının mantığına göre CPU, girişleri izler ve Boole mantığı, sayma, zamanlama, karmaşık matematiksel işlemler ve diğer akıllı cihazlarla iletişim gibi çıkışları değiştirir[1].

e) Uzaktan İzleme ve Yönetim

Uzaktan izlenebilirlik, akıllı atık ayrıştırma sistemlerinin en önemli avantajlarından biridir.

- Sistem performansı gerçek zamanlı takip edilebilir,
- Arıza ve bakım ihtiyaçları önceden tespit edilebilir,
- Enerji tüketimi ve verimlilik analizleri yapılabilir,

- Operatör müdahalesi minimum seviyeye indirilebilir.

Bu işlemler sayesinde hem işletme maliyetleri düşmekte hem de sistem sürekliliği artmaktadır.

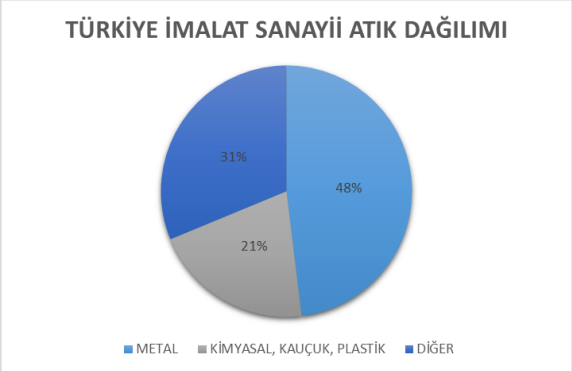
B. Türkiye'de Katı Atık Yönetimi

2017 yılında hayata geçirilen Sıfır Atık Projesi'nde 16,5 milyon ton kâğıt ve karton, 4,1 milyon ton plastik, 1,7 milyon ton cam, 0,4 milyon ton metal, 1,5 milyon ton organik ve diğer geri dönüştürülebilir atık olmak üzere toplamda yaklaşık 24,2 milyon ton atık üretildi. Geri dönüştürülebilir atıklar ekonomiye kazandırılmıştır. Ayrıca bu proje, 2017 yılında %13 olan iyileşme oranını Ağustos 2021 itibarıyla %22,4'e çıkarmıştır [10].

2019 yılında alınan karar ile plastik poşet kullanımı %75 oranında azaltılarak, plastik poşet kaynaklı 354.000 ton plastik atık oluşumu engellenmiştir. Alınan karar nedeniyle plastik poşet üretimi için gerekli olan plastik hammadde ithalatı azaltılmış; yaklaşık 2,44 milyar Türk Lirası (TL) tasarruf sağlanarak 14640 ton sera gazı emisyonu önlendi [10].

TÜİK Araştırması kapsamında imalat sanayi işyerleri, maden işletmeleri, termik santraller, organize sanayi bölgeleri (OSB) ve hane halklarında 2024 yılında 42,2 milyon tonu tehlikeli olmak üzere toplam 120 milyon ton atık oluştu [11].

İmalat sanayi işyerlerinde 4,2 milyon tonu tehlikeli olmak üzere toplam 24,4 milyon ton atık oluştu. Bu atıkların %48,1'i Metal, %20,7'si ise kimyasal, temel eczacılık, kauçuk ve plastiktir. Toplam atığın %70,1'i satıldı veya lisanslı atık işleme tesislerine gönderildi. %12,1'i tesis bünyesinde geri kazanıldı veya dolgu malzemesi olarak kullanıldı veya doğaya yeniden kazandırıldı. %10,8'i düzenli depolama tesislerine gönderildi, %2,6'sı beraber yakma (ko-insinerasyon) veya yakma tesislerine gönderildi, %2,4'ü belediye veya OSB yönetimleri tarafından toplandı, %1,8'i işyeri sahasında depolandı, %0,1 ise diğer yöntemlerle bertaraf edildi [11]. Bu verilerden görüldüğü üzere ülkemizdeki sanayi atıklarının büyük bir kısmı metal ve plastikten oluşmakta olup geri kazandırılma oranımız ise düşük kalmaktadır.



Şekil 5. Türkiye'deki sanayi katı atık dağılımı grafiği[1]

- SONUÇLAR

Akıllı katı atık ayrıştırma sistemlerinin sunduğu kazanımlar yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel boyutları da kapsamaktadır. Geliştirilmiş akıllı ayrıştırma sistemlerinin sağladığı kazanımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Ayrıştırma hatalarının minimize edilmesi
- Sistem bileşenlerinin birbirleriyle uyumlu ve senkronize çalışması
- Geri kazanılabilir malzeme oranının artması
- İş gücü maliyetlerinde azalma
- Uzun vadede yatırım geri dönüş süresinin kısalması
- Düzenli depolama alanlarına giden atık miktarının azaltılması
- Doğal kaynak tüketiminin düşürülmesi
- Sera gazı emisyonlarının azaltılması

Akıllı katı atık ayrıştırma sistemlerinin sağladığı başlıca avantajlar ise şunlardır:

- Daha yüksek ayrıştırma doğruluğu ve geri dönüşüm oranı
- İş gücü ve işletme maliyetlerinde azalma
- Gerçek zamanlı veri ile karar destek mekanizmalarının güçlenmesi
- Çevresel etkilerin ve karbon ayak izinin azaltılması
- Döngüsel ekonomi uygulamalarına katkı

Her ne kadar akıllı katı atık ayrıştırma sistemleri önemli avantajlar sunsa da uygulama sürecinde çeşitli teknik ve yönetsel engellerle karşılaşılmaktadır.

- Sensörlerin çevresel koşullardan etkilenmesi
- Karma atık yapıları nedeniyle sınıflandırma doğruluğunun düşmesi
- Sistem entegrasyonunda yaşanan yazılım uyumsuzlukları
- Yüksek ilk yatırım maliyetleri
- Yapay zekâ modelleri için büyük ve nitelikli veri ihtiyacı

Endüstri 4.0 teknolojileri, katı atık ayrıştırma sistemlerinde verimlilik, sürdürülebilirlik ve izlenebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Uzaktan izlenebilir ve yönetilebilir akıllı sistemler, çevresel sorunların azaltılmasında ve kaynakların etkin kullanımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, kamu ve özel sektör yatırımlarının bu alana yönlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de kaynakta ayrıştırma çabaları ile Endüstri 4.0 destekli ayrıştırma tesislerinin uyumu, ülkenin geri kazanım oranlarını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, bu sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini ve küçük ölçekli işletmelerde uygulanabilirliğini daha derinlemesine incelemelidir. Sonuç olarak, uzun vadeli maliyet analizi genellikle manuel ayırmanın otomatik ayırmadan daha az maliyet etkin olduğunu gösterecektir. Manuel işleme, geri kazanım malzemesi için daha yüksek kalite üretebilir; ancak düşük ayırma oranları nedeniyle etkisizdir [1]. Ayrıca ülkemizdeki fabrika atıklarının büyük bölümünün metalden oluşması geri kazanım çerçevesinde önemli bir ekonomik potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] K. Chahine and B. Ghazal, "Automatic Sorting of Solid Wastes Using Sensor Fusion," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 4408–4414, Dec. 2017, doi: 10.21817/ijet/2017/v9i6/170906127.

[2] Prof. M. D. Karambe, D. M. khandait, S. Shah, V. Varambhe, and S. Nagwanshi, "Development and Fabrication of Solar powered Smart Waste Segregation Machine," *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 5, no. 5, pp. 5805–5810, May 2024, doi: 10.55248/gengpi.5.0524.1263.

[3] D. D. Olodu, A. Erameh, and O. I. Ihenyen, "Design and Fabrication of a Low-Cost Automated Waste Sorting and Recycling System," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, vol. 9, no. 1, p. 30, 2025, doi: 10.36287/ijmsit.9.1.5.

[4] K. A. Porokhnenko, T. V. Kustov, and E. V. Zimin, "Development of Portable Waste Sorting System," in *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, IEEE, Jan. 2022, pp. 1569–1571. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755538.

[5] M. Koskinopoulou, F. Raptopoulos, G. Papadopoulos, N. Mavrakis, and M. Maniadakis, "Robotic Waste Sorting Technology: Toward a Vision-Based Categorization System for the Industrial Robotic Separation of Recyclable Waste," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 28, no. 2, pp. 50–60, Jun. 2021, doi: 10.1109/MRA.2021.3066040.

[6] T. Cheng, D. Kojima, H. Hu, H. Onoda, and A. H. Pandyaswargo, "Optimizing Waste Sorting for Sustainability: An AI-Powered Robotic Solution for Beverage Container Recycling," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10155, Nov. 2024, doi: 10.3390/su162310155.

[7] R. Laszlo, R. Holonec, R. Copindean, and F. Dragan, "Sorting System for e-Waste Recycling using Contour Vision Sensors," in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, IEEE, May 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/MPS.2019.8759739.

[8] A. KİNGSLEY and D. D. OLODU, "Design and construction of a wood-based modified yam pounder machine," *International Journal of Energy Applications and Technologies*, vol. 9, no. 1, pp. 22–30, Mar. 2022, doi: 10.31593/ijeat.1045514.

[9] N. Taneepanichskul, D. Purkiss, and M. Miodownik, "A Review of Sorting and Separating Technologies Suitable for Compostable and Biodegradable Plastic Packaging," *Frontiers in Sustainability*, vol. 3, May 2022, doi: 10.3389/frsus.2022.901885.

[10] K. Ulusoy, N. Doğan-sağlamtimur, P. M. Sekuła, and A. Sternık, "Waste classification and separation practices from Türkiye and selected countries of the world," *Environmental Research and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 258–265, Sep. 2023, doi: 10.35208/ert.1252594.

[11] "Atık İstatistikleri - 2024 - Veri Portalı - TÜİK".

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Techliff: Web için Yapay Zeka Destekli Makine Mühendisliği Teklif Uygulaması

Ömer Faruk Söyler[a], Muhammet Sinan Başarslan[a],*

[a]Istanbul Medeniyet University, Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering,, Istanbul/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** mail@mail.edu.tr

ÖZET

Mekanik tesisat projeleri için teknik bileşenlerin hassas bir şekilde seçilmesi, maliyet tahmininin yapılması ve belgelendirilmesi gerekmektedir. Bu sektördeki geleneksel teklif hazırlama süreçleri çoğunlukla manuel olup, PDF/Excel formatındaki ürün listelerine ve mühendislik odaklı hesaplamalara dayanmaktadır. Bu iş akışları zaman alıcı ve hataya açık olup, standartlaştırma eksikliği de bulunmaktadır. Bu çalışma, mekanik tesisat mühendisliği için tasarlanmış, yapay zeka destekli, çoklu ajanlı ve OCR destekli bir teklif oluşturma platformu olan Techliff'i tanıtmaktadır. Sistem, OCR (Tesseract) [1], görüntü işleme (OpenCV [2] ve YOLO[3]), çoklu ajan yapay zeka modülleri ve Vue.js tabanlı, insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) odaklı bir arayüzü entegre etmektedir. Arka uç hizmetleri .NET 8 Web API [4] ve PostgreSQL [5] üzerine kurulurken, yapay zeka bileşenleri Python[6], Pandas [7], NumPy [8] ve TensorFlow [9] kullanmaktadır. Platform, ürün-fiyat verilerinin otomatik olarak çıkarılmasını, tekliflerin parametrik olarak özelleştirilmesini, PDF çıktılarının oluşturulmasını ve bulut tabanlı depolamayı mümkün kılar. Bulgular, Techliff'in işlem süresini, insan hatalarını ve veri yinelemesini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Mekanik tesisat sektörü için ölçeklenebilir bir dijital çözüm sunarak mühendislik verimliliğine ve dijital dönüşüme katkıda bulunur.

Anahtar Kelimeler: *İnsan-Bilgisayar etkileşimi, Web uygulaması, Yapay zeka, Mekanik kurulum.*

Techliff: An AI-Driven Mechanical Engineering Quotation Application for the Web

ABSTRACT

Mechanical engineering projects require the precise selection of technical components, cost estimation, and documentation. Traditional bid preparation processes in this sector are largely manual, relying on product lists in PDF or Excel formats and engineering-focused calculations. These workflows are time-consuming and prone to errors, and there is a lack of standardization. This study introduces Techliff, an AI-powered, multi-agent, and OCR-supported proposal generation platform designed for mechanical engineering. The system integrates OCR (Tesseract) [1], image processing (OpenCV [2] and YOLO [3]), multi-agent AI modules, and a Vue.js-based, human-computer interaction (HCI)-focused interface. While the backend services are built on .NET 8 Web API [4] and PostgreSQL [5], the AI components utilize Python [6], Pandas [7], NumPy [8], and TensorFlow [9]. The platform enables the automatic extraction of product-price data, the parametric customization of quotes, the generation of PDF outputs, and cloud-based storage. Findings indicate that Techliff significantly reduces processing time, human errors, and data duplication. By offering a scalable digital solution for the mechanical engineering sector, it contributes to engineering efficiency and digital transformation.

Keywords: *Human–Computer interaction, Web application, Artificial intelligence, Mechanical installation.*

I. GİRİŞ

Mechanical installation systems—including heating, cooling, ventilation, fire suppression, plumbing, and natural gas infrastructure—constitute critical subsystems in building engineering. These systems require meticulous planning and precise equipment selection to ensure safety, efficiency, and sustainability. Proposal preparation is one of the most sensitive components of this workflow, involving cost estimation, technical suitability assessment, regulatory compliance, and product configuration.

In current practice, engineers manually analyze product catalogs typically provided as PDF, Excel files, or scanned images. Product information—including unit prices, diameters, brand specifications, and applicable taxes—is manually transferred into Excel-based templates. This manual workflow introduces data inconsistencies, increases cognitive load, and creates substantial room for human error. Studies in the human-computer interaction (HCI) and engineering management domains confirm the negative impact of manual data handling on productivity and decision accuracy [11-14].

The Techliff system aims to address these limitations by providing a fully integrated, AI-powered, automated proposal generation platform that streamlines engineering operations through OCR, AI-driven document processing, and a user-centered web interface.

II. Human Computer Interaction

Human–Computer Interaction (HCI) focuses on optimizing user–system communication, emphasizing usability, cognitive load reduction, interface accessibility, and human-oriented design principles [11]. In engineering contexts, HCI contributes to reducing input errors, supporting decision-making, and improving information flow, particularly in complex tasks such as technical costing and product selection.

Most commercial proposal tools in literature are integrated into CRM systems and require manual entry of product-price data, making them unsuitable for mechanically intensive engineering domains where component diversity is high [11], [12].

OCR-based document digitization has been applied in areas such as invoice processing, ID recognition, form extraction, and document archiving [1]. However, the literature lacks systems capable of transforming unstructured mechanical installation catalog data into structured, proposal-ready engineering outputs.

Additionally, multi-agent AI workflows—where multiple specialized agents collaboratively parse, validate, and transform data—have gained attention for their robustness in handling complex tasks.

- Techliff bridges this gap by combining:
- OCR (PyTesseract)
- Image/table analysis (OpenCV [2], YOLO [3])
- Multi-agent AI orchestration
- Vue.js user-centered design
- Automated decision-support logic

The system aligns with HCI heuristics such as minimal cognitive load, clear navigation structure, and real-time feedback loops [7-9].

III. Material Methods

This study covers Techliff, a multi-layered, integrated, and modular web application developed to digitize and automate the bid preparation processes of mechanical engineering professionals. Throughout the development process, both academic engineering approaches and field requirements derived from industry realities were taken into account. The system is structured across four core technical layers—backend, frontend, database & API connections, and AI-powered data processing infrastructure—with priority given to user experience, data processing accuracy, performance, and security criteria.

A. General System Architecture

System architecture: The backend was built using .NET 8 Web API in accordance with a layered architecture that includes authentication (JWT), logging (NLog), exception-handling middleware, rate limiting, and caching mechanisms [4]. Data access is provided via Entity Framework Core [10] using the Code-First approach on PostgreSQL [5]. The front end was developed using Vue.js, incorporating a reactive, component-based design consistent with HCI and usability engineering principles [22]. A REST API facilitates communication between the front-end and back-end services. Figure 1 illustrates the system architecture.

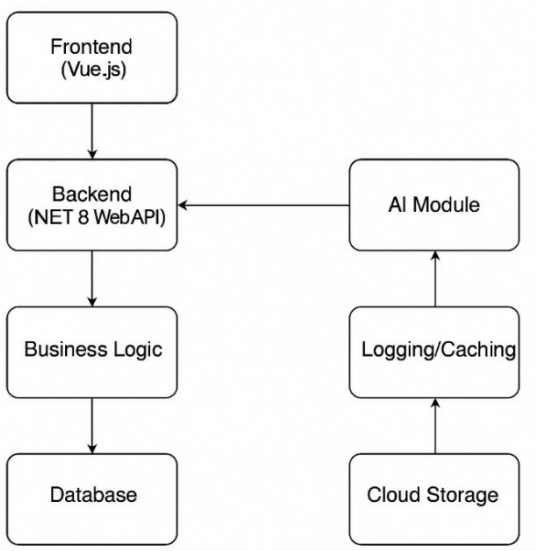


Figure 1. System architecture

In Figure 1, all operations performed on the client side (product selection, rate entry, quote creation, etc.) are transmitted to the backend via the API, where the relevant data is either retrieved directly from the database or processed by artificial intelligence modules.

B. Software and frameworks used in the study

The software infrastructure used in this project was designed based on modern web technologies to ensure high flexibility in terms of sustainability and scalability. Backend development was implemented using a layered architecture approach on the .NET 8 Web API platform [4], and complementary components such as JWT-based authentication, log management with NLog, exception-handling middleware, rate limiting, and caching mechanisms were integrated into the system.

The Service–Repository design pattern was employed to separate business logic from data access, adhering to clean code and sustainable software architecture principles. On the data management side, the Code-First approach was adopted using the PostgreSQL database [5] and Entity Framework Core [10], ensuring relational integrity across data tables including users, quotes, products, brands, settings, and quote items.

The front end of the application was developed using the Vue.js framework in a component-based architecture [22]. To enhance user experience, features such as a step-by-step (wizard) interface, dynamic dropdowns, modal components, a quotation customization interface, and PDF generation and storage functionalities were implemented. All data exchange between the front-end and back-end components is facilitated through Axios using a RESTful API architecture.

C. Agent-Based AI Data Processing Workflow

The most innovative component of the study is the multi-agent, AI-powered data extraction infrastructure. This framework is built on an orchestration model in which three distinct software agents, each with different areas of expertise, work together to completely eliminate the need for engineers to manually transfer data from price lists. Comprising the AI Parser Agent, Price Scraper Agent, and Supplier Research Agent, this layer can process catalogs in PDF, image, or Excel formats and convert them into meaningful product data. The processes are executed not through a monolithic module approach, but via a task-based, multi-agent (agentic AI) architecture. The AI Parser Agent performs OCR operations using PyTesseract, table extraction using OpenCV [2], document analysis using YOLO [3], and content transformation using Pandas [7]–NumPy [8], ultimately enabling final data extraction via the GPT-4o-mini model [23]. The Price Scraper Agent uses Selenium and BeautifulSoup to download price lists in PDF or XLSX format from suppliers' websites and perform quality control checks; the Supplier Research Agent, meanwhile, enables the identification of relevant suppliers through semantic web search, ChromaDB-based filtering, and Serper API support. The general operation of this multi-agent architecture is as follows: As shown in Figure 2, the system operates by sequentially passing through the Supplier Research Agent, Price Scraper Agent, and AI Parser Agent components, and the resulting data is output in JSON format in the final stage..

IV. TECHLIFF APP WITH HCI

The page where the system allows engineers to prepare quotes. It includes fields such as product name, brand, unit, unit price, VAT, labor, and discount.

When an engineer wants to create a new quote in the system:

- They select a brand, and the system lists the products associated with that brand.

- Product details (unit, diameter, unit price) are automatically populated.
- The user enters VAT, discount, and labor values.
- The system generates a line-item and total quote output in PDF format.
- The quote is presented to the user and also stored in the cloud database.

Thanks to this system, engineers can create quotes quickly and reliably without the need for manual data entry. They can also access their quote history and create new quotes by copying previous ones.

The newly developed Techliff platform offers an intuitive, component-based user interface that guides engineers step-by-step through the proposal creation process. The application's first version has been completed at the Minimum Viable Product level, and all core functionalities are now ready for testing in a live environment.

V. Result and Discussion

The AI-powered Mechanical Engineering Quotation Application developed as part of this study—Techliff, a web platform streamlined through human-computer interaction—aims to provide a digital, fast, and reliable solution to the quotation preparation processes that engineers currently carry out manually, which result in significant time losses. The application is not merely a tool for generating proposals; it is designed as a multi-layered platform that integrates user interaction, data integrity, automation, and AI processing capabilities. The development process was based on the needs, workflows, and challenges faced by field engineers, with the primary goal of ensuring the system aligns with real-world industry requirements.

The findings indicate that the developed platform enables engineers to make selections regarding products, brands, and categories quickly and accurately. The automated quotation generation mechanism, which reduces the risk of errors associated with manual calculations, provides users with significant time savings. The ability to customize quotes with parameters such as VAT, labor costs, and discounts enables the system to provide flexible outputs suitable for different customer and project types. From this perspective, the platform offers a more professional, user-friendly, and sustainable structure compared to traditional Excel-based methods.

Technical tests and user experiences demonstrate that the system significantly eliminates inefficiencies in the manual bidding process, reduces the workload, and minimizes error rates. The centralized storage of bids enhances information management by enabling both individual users and companies to access historical data more easily. This feature offers a significant advantage, particularly in terms of monitoring long-term proposal policies and supporting strategic decision-making.

However, the system has some areas that are still under development and not yet fully implemented. Integrating companies' inventory data into the platform would enable proposals to be created with more realistic and up-to-date costs. A workflow management module developed for field personnel could transform the project into a comprehensive digital solution that supports not only the proposal phase but also field coordination and process management. Additionally, direct integration of price lists through data partnerships with manufacturers will reduce the need for manual data processing, thereby enhancing the system's accuracy and timeliness.

It is evident that this project goes beyond being merely an academic study to offer a practical, application-focused software solution that addresses an industry need. The fact that the application was tested under real-world conditions within a family-owned business demonstrates that the developed platform is effective in practice and has been continuously refined and optimized based on actual user experience. This situation demonstrates that the system has evolved from a theoretical proposal into a directly applicable product.

From a personal perspective, the project has yielded significant gains across multifaceted areas such as software architecture, data processing, artificial intelligence, user experience design, and project management; the technical and analytical competencies developed have established a strong foundation for professional practice.

In conclusion, this study has produced an innovative application that digitizes bidding processes in the mechanical engineering sector, offers customized solutions to users, and operates in alignment with industry requirements. With a sustainable development approach, the goal is to expand the system's scope in the future, make it applicable across different sectors, and enhance its artificial intelligence-based analytical capabilities. In these respects, the project is regarded as a unique model that makes concrete contributions to both engineering efficiency and the digital transformation process.

Acknowledgment

This publication is based on a thesis study supported underI would like to express my sincere gratitude to my advisor, Dr. Muhammet Sinan Başarslan, for his unwavering support, guidance, and insightful

contributions throughout every stage of this journey. I also extend my thanks to TÜBİTAK 2209-B University Students Research Projects Support Program, which provided financial support for the project, and to all committee members involved in this process. During the development of this project, I also greatly benefited from the knowledge and experience of my father, who has been actively engaged in the sector for many years. His guidance played a significant role in ensuring that this project would address real-world needs. It is planned that the application will be actively used within our family business in the future, directly contributing to the sector. I would like to especially thank my father, Mehmet Emin Söyler, for his invaluable support. Dedicated to the memory of Ömer Faruk Söyler, who, although he prepared this paper, did not have the opportunity to present it

REFERENCES

[1] J. M. Jayoma et al., "OCR Based Document Archiving and Indexing Using PyTesseract," in Proc. IEEE HNICEM, 2020.
[2] . Bradski, "The OpenCV Library," Dr. Dobb's Journal, 2000.
[3] J. Redmon et al., "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," in Proc. CVPR, 2016.
[4] Microsoft, "ASP.NET Core Documentation." [Online]. Available: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/
[5] PostgreSQL Global Development Group, "PostgreSQL Documentation." [Online]. Available: https://www.postgresql.org/docs/
[6] G. Van Rossum and F. L. Drake, Python 3 Reference Manual. CreateSpace, 2009.
[7] W. McKinney, Python for Data Analysis. O'Reilly Media, 2017.
[8] T. E. Oliphant, A Guide to NumPy. Trelgol Publishing, 2006.
[9] M. Abadi et al., "TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning," in Proc. OSDI, pp. 265–283, 2016.
[10] Microsoft, "Entity Framework Core Documentation." [Online]. Available: https://learn.microsoft.com/en-us/ef/core/
[11] A. Dix, J. Finlay, G. Abowd, and R. Beale, Human-Computer Interaction, 3rd ed. Pearson, 2004.
[12] D. Norman, The Design of Everyday Things. MIT Press, 2013.
[13] Preece, Y. Rogers, and H. Sharp, Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. Wiley, 2019.
[14] B. Shneiderman et al., Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction, 6th ed. Pearson, 2016.
[15] B. Flask and L. Harper, "Cloud-Based Offer Management Systems in Construction Projects: A Comparative Study," International Journal of Engineering Research, vol. 8, no. 2, pp. 99–110, 2020.
[16] H. Kurniawan, "A Review on Offer Automation Technologies in Engineering Management," Journal of Industrial Engineering Innovation, vol. 5, no. 1, pp. 45–52, 2019.
[17] J. Nielsen, Usability Engineering. Morgan Kaufmann, 1994.
[18] J. Nielsen, "10 Usability Heuristics for User Interface Design," Nielsen Norman Group, 1995.
[19] S. Krug, Don't Make Me Think: A Common Sense Approach to Web Usability, 3rd ed. New Riders, 2014.
[20] G. Galloway, P. Haack, B. Wilson, and K. S. Allen, Professional ASP.NET MVC 4. Wiley, 2012.
[21] M. J. Price, C# 10 and .NET 6 – Modern Cross-Platform Development. Packt Publishing, 2021.
[22] Vue.js, "The Progressive JavaScript Framework." [Online]. Available: https://vuejs.org
[23] OpenAI, "GPT-4 Technical Report," 2024.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Prefabrik Yapı Elemanları Üretiminde Enerji ve Kaynak Verimliliğinin Değerlendirilmesi: Bir Uygulama Örneği

Kutay Aykut[a], Alper Bideci[b], Emrah Yılmaz[c]*

[a]Betonel Prefabrik A.Ş, Saray Mahallesi Adnan Menderes Bulvarı 56. Sokak No:7 Yenimahalle, Ankara, Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Sanat, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce, Türkiye.
[c]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** alperbideci@duzce.edu.tr

ÖZET

Enerji yoğun üretim süreçlerine sahip olan prefabrik yapı elemanları sektörü, sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda enerji ve kaynak verimliliğinin etkin bir şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Artan enerji maliyetleri, çevresel etkilerin azaltılması gerekliliği ve endüstriyel üretimde rekabet gücünün artırılması, üretim tesislerinde enerji performansının sistematik olarak izlenmesini ve iyileştirilmesini önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada, prefabrik yapı elemanları üreten bir üretim tesisinde gerçekleştirilen enerji verimliliği uygulamaları ve süreç iyileştirmeleri sonucunda elde edilen enerji performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında tesisin üretim süreçlerinde kullanılan başlıca kaynak girdileri olan doğalgaz, elektrik ve su tüketimleri üretim hacmi ile ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. İlk aşamada mevcut tüketim değerleri belirlenmiş ve özgül enerji tüketimleri üretim miktarına bağlı performans göstergeleri olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda enerji ve kaynak tüketimlerinin azaltılması amacıyla üretim süreçlerinde çeşitli teknik ve operasyonel iyileştirmeler uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda tesisin özgül enerji ve su tüketimlerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Yapılan optimizasyon ve izleme faaliyetleri neticesinde doğalgaz tüketimi 17 m^3, elektrik tüketimi 13 kWh/m^3 ve su tüketimi 0,42 m^3 seviyelerine kadar düşürülmüştür. Hesaplamalar sonucunda, birim üretim başına toplam karbon ayak izi kazanımının 8,72 $kgCO_2e/m^3$ olduğu ve su tüketimindeki iyileşmeye bağlı olarak 0,23 m^3 düzeyinde su kazanımı sağlandığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, veri temelli enerji yönetimi yaklaşımlarının endüstriyel üretim tesislerinde kaynak verimliliğini ve çevresel performansı artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Prefabrik yapı elemanları, Enerji verimliliği, Karbon ayak izi, Su verimliliği, sürdürülebilir üretim.*

Evaluation of Energy and Resource Efficiency in the Production of Prefabricated Building Elements: A Case Study

Kutay Aykut[a], Alper Bideci[b], Emrah Yılmaz[c]*

[a]Betonel Prefabrik A.Ş, Saray Mahallesi Adnan Menderes Bulvarı 56. Sokak No:7 Yenimahalle, Ankara, Türkiye.
[b]Düzce University, Faculty of Art, Design and Architecture, Department of Architecture, Düzce, Türkiye
[c]Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Düzce, Türkiye.[*]

Corresponding Author: alperbideci@duzce.edu.tr

ABSTRACT

Energy-intensive production processes in the prefabricated structural elements sector require the effective management of energy and resource efficiency in line with sustainable production objectives. Increasing energy costs, the necessity to reduce environmental impacts, and the need to enhance competitiveness in industrial production have made the systematic monitoring and improvement of energy performance in manufacturing facilities increasingly important. This study aims to evaluate the energy performance achieved through energy efficiency applications and process improvements implemented in a manufacturing facility producing prefabricated structural elements. Within the scope of the study, the

primary resource inputs used in the production processes—namely natural gas, electricity, and water consumption—were analyzed in relation to production volume. In the initial stage, existing consumption values were determined and specific energy consumption indicators were defined as performance metrics based on production quantity. Accordingly, various technical and operational improvements were implemented in the production processes to reduce energy and resource consumption. As a result of these efforts, significant improvements were achieved in the facility's specific energy and water consumption. As a result of the optimization and monitoring activities carried out, natural gas consumption was reduced to 17 m^3, electricity consumption to 13 kWh/m^3, and water consumption to 0.42 m^3. According to the calculations, the total carbon footprint reduction per unit production was determined to be 8.72 $kgCO_2e/m^3$, while a water saving of 0.23 m^3 was achieved due to the improvement in water consumption. The findings indicate that data-driven energy management approaches are effective in enhancing resource efficiency and environmental performance in industrial production facilities.

Keywords: *Prefabricated building elements, Energy efficiency, Carbon footprint, Water efficiency, Sustainable production.*

I. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ile mücadele kapsamında endüstriyel üretim süreçlerinin karbonsuzlaştırılması, günümüz mühendislik çalışmalarının odak noktasını oluşturmaktadır. İnşaat sektörü, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %35'inden ve sürece bağlı CO_2 emisyonlarının %38'inden sorumlu tutulmaktadır [1]. Bu büyük pay içerisinde prefabrik yapı elemanları üretimi, endüstriyel hızı ve malzeme tasarrufu avantajlarıyla öne çıksa da, üretim safhasındaki yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır.

Prefabrik beton endüstrisinde enerji tüketimi temel olarak iki ana kanalda yoğunlaşmaktadır: Elektrik enerjisi ve termal enerji. Literatürde, prefabrik tesislerdeki elektrik tüketiminin çoğunlukla agregaların taşınması, betonun karıştırılması (mikserler) ve basınçlı hava sistemlerinden kaynaklandığı belirtilmektedir [2]. Diğer taraftan, termal enerji kullanımı—özellikle betonun erken yaşta yüksek mukavemet kazanmasını sağlayan buhar kürü süreci— tesisin toplam enerji maliyetinin %60 ile %80'ini oluşturabilmektedir [3]. Buhar kürü, üretim çevrim süresini kısaltsa da, kazan kayıpları ve yetersiz izolasyon nedeniyle yüksek miktarda doğalgaz tüketimine yol açmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, "Endüstri 4.0" ve "Enerji Yönetimi 4.0" kavramlarının prefabrikasyon süreçlerine entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Shrouf vd. (2014) tarafından belirtildiği üzere, gerçek zamanlı enerji izleme sistemleri, üretim sahasındaki enerji "kör noktalarını" görünür kılarak verimlilik artışına olanak tanımaktadır [4]. Benzer şekilde, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi standartları, endüstriyel tesislerde sistematik bir iyileştirme döngüsü (Planla – Uygula - Kontrol Et - Önlem Al) oluşturulmasını teşvik etmektedir. Ancak prefabrikasyon sektöründe, üretim hacmi ile kaynak tüketimi (su, elektrik, yakıt) arasındaki ilişkinin dinamik bir şekilde analiz edildiği ve özgül tüketim değerlerinin (kWh/m^3, m^3/m^3) optimize edildiği saha çalışmaları hala sınırlı sayıdadır.

Türkiye özelinde ise, artan enerji maliyetleri ve 2053 "Net Sıfır Emisyon" hedefi doğrultusunda, prefabrik yapı elemanları üreten tesislerin operasyonel verimliliklerini artırması bir seçenekten ziyade zorunluluk haline gelmiştir. Betonun sürdürülebilirliği üzerine yapılan araştırmalar genellikle çimento ikame malzemeleri (uçucu kül, cüruf vb.) üzerine yoğunlaşmış olsa da, üretim sürecindeki mekanik ve termal optimizasyonlar, anlık enerji yoğunluğunu düşürmede en hızlı sonucu veren yöntemlerdir [5].

Bu çalışma, prefabrik yapı elemanları üretiminde enerji ve kaynak verimliliğinin artırılmasına yönelik veri temelli bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma kapsamında, mevcut literatürdeki boşlukları doldurmak amacıyla, bir üretim tesisindeki doğalgaz, elektrik ve su tüketimleri üretim hacmiyle ilişkilendirilmiş; teknik ve operasyonel iyileştirmelerin ardından elde edilen veriler analiz edilerek sektör için referans performans göstergeleri (KPI) tanımlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma, Ankara'da faaliyet gösteren, yıllık ortalama 150.000 m^3 üretim kapasitesine sahip entegre bir prefabrik yapı elemanları tesisinde yürütülmüştür. Araştırma metodolojisi; mevcut durumun tespiti (baz hattı oluşturma), teknik iyileştirmelerin uygulanması ve performansın istatistiksel analizi olmak üzere üç ana fazdan oluşmaktadır.

A. Veri Toplama Sistemi ve Ölçüm Enstrümantasyonu

Tesisin enerji profili, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi [6] standartlarına uygun olarak dijitalleşmiş bir altyapı üzerinden takip edilmiştir. Verilerin hassasiyeti için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmıştır:

Elektrik: Ana dağıtım panolarına ve yüksek güç tüketen motor gruplarına (beton santrali mikserleri, vinçler) yerleştirilen Class 0.5S doğruluk sınıfına sahip akıllı enerji analizörleri.

Doğalgaz: Buhar jeneratörü girişinde yer alan, sıcaklık ve basınç düzeltmesi yapabilen türbin tipi debimetreler.

Su: Üretim hattı ve kuyu suyu girişlerine entegre edilmiş ultrasonik debimetreler.

B. Özgül Kaynak Tüketimi (SEC) Hesaplama Metodolojisi

Sektörel kıyaslamaların (benchmarking) yapılabilmesi için literatürde yaygın olarak kullanılan Özgül Enerji Tüketimi (Specific Energy Consumption - SEC) formülasyonu benimsenmiştir [7]. Hesaplamalar şu genel eşitlik 1 formülü üzerinden yürütülmüştür:

$$SEC = \frac{\sum Ei}{Pn} \quad (1)$$

Burada E_i toplam enerji girdisini (kWh veya m^3), P_n ise ilgili dönemdeki net üretim hacmini (m^3) temsil etmektedir. Doğalgaz verileri, alt ısıl değer (AID) dönüşümleri yapılarak enerji birimine (kWh) çevrilmiş ve toplam enerji yoğunluğu analizlerine dahil edilmiştir.

C. Uygulanan Proses İyileştirme ve Optimizasyon Teknikleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen teknik iyileştirmeler iki ana başlıkta sınıflandırılmıştır:

Termal Sistemlerin İyileştirilmesi (Isıl Kürleme)

Betonun priz alma süresini hızlandırmak amacıyla kullanılan buhar kürü sisteminde, ısı kayıplarının minimize edilmesi için "Isıl Radyasyon Analizi" yapılmıştır. Yapılan tespitler doğrultusunda:

- Buhar hatlarındaki vanalar ve flanşlar vana ceketleri ile izole edilmiştir.
- Kürleme odalarının kapı sızdırmazlıkları polimerik contalarla yenilenmiştir.
- Buhar jeneratörlerinde baca gazı analizörleri yardımıyla fazla hava katsayısı (λ) optimize edilmiştir [8].

Elektrikli Tahrik Sistemleri ve Su Geri Kazanımı

- VFD Uygulamaları: Beton mikser motorları ve toz toplama fanlarında, kalkış akımlarını ve değişken yüklerdeki tüketimi dengelemek için Değişken Frekanslı Sürücüler (Variable Frequency Drive) kullanılmıştır.
- Basınçlı Hava Yönetimi: Tesis genelinde ultrasonik dedektörlerle kaçak avı yapılmış ve hat basıncı 7,5 bar'dan 6,3 bar seviyesine düşürülerek kompresör spesifik gücü iyileştirilmiştir.
- Kapalı Devre Su Sistemi: Beton yıkama suları için inşa edilen çöktürme havuzlarına, flokülasyon üniteleri eklenerek suyun bulanıklığı giderilmiş ve taze beton karışım suyu olarak kullanımı uygun hale getirilmiştir [9-10].

D. Karbon Ayak İzi ve Su Tüketimi Hesaplama Yaklaşımı

Karbon ayak izi analizinde, iyileştirme öncesi ve sonrası döneme ait özgül doğal gaz ve özgül elektrik tüketim değerleri dikkate alınmış, bu tüketim farkları uygun emisyon faktörleri ile çarpılarak birim üretim başına karbon ayak izi kazanımı hesaplanmıştır. Elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonların belirlenmesinde, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan Türkiye elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri esas alınmış; dağıtım hattına bağlı tüketim için 0,469 $kgCO_2e/kWh$ değeri kullanılmıştır [12]. Doğal gaz tüketiminden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında ise DEFRA dönüşüm faktörlerinden yararlanan literatür verisi esas alınmış ve doğal gaz için 2,02266 $kgCO_2e/m^3$ emisyon faktörü kabul edilmiştir [13].

Bu kapsamda karbon ayak izi kazanımı aşağıdaki eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\Delta CF=(\Delta NG\times EF_{NG})+(\Delta EL\times EF_{EL}) \quad (2)$$

Burada *ΔCF*, birim üretim başına karbon ayak izi kazanımını (*$kgCO_2e/m^3$*); *ΔNG*, iyileştirme sonrası özgül doğal gaz tüketimindeki azalmayı *(m^3/m^3)*; *EF_{NG}*, doğal gaz emisyon faktörünü *($kgCO_2e/m^3$)*; *ΔEL*, iyileştirme sonrası özgül elektrik tüketimindeki azalmayı *(kWh/m^3)*; FE_{EL} ise elektrik tüketimine ait emisyon faktörünü *($kgCO_2e/kWh$)* ifade etmektedir.

Su ayak izi değerlendirmesinde ise iyileştirme öncesi ve sonrası özgül su tüketim değerleri esas alınarak doğrudan su tüketimi azalımı hesaplanmıştır. ISO 14046 çerçevesinde su ayak izi, su kullanımıyla ilişkili

çevresel etkilerin değerlendirilmesine dayansa da, mevcut veri seti temelinde en doğrudan ve güvenilir çıktı volümetrik su tüketimi farkıdır. Bu nedenle çalışmada su kazanımı, birim üretim başına özgül su tüketimindeki azalış üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu amaçla su kazanımı aşağıdaki eşitlik 3 kullanılarak belirlenmiştir:

$$\Delta WF = W_{önce} - W_{sonra} \quad (3)$$

Burada ΔWF, birim üretim başına su kazanımını *(m^3/m^3); $W_{önce}$*, iyileştirme öncesi özgül su tüketimini *(m^3/m^3); W_{sonra}* ise iyileştirme sonrası özgül su tüketimini *(m^3/m^3)* göstermektedir. Böylece, uygulanan iyileştirmelerin çevresel etkileri, birim üretim başına karbon emisyonu azaltımı ve su tüketimi kazanımı üzerinden nicel olarak değerlendirilmiştir.

III. SONUÇLAR

Tesis genelinde yürütülen teknolojik dönüşüm ve süreç optimizasyonu faaliyetleri neticesinde, enerji ve kaynak verimliliği parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı iyileşmeler kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular; doğalgaz, elektrik ve su tüketimi başlıkları altında, birim üretim hacmi (m^3) bazında standardize edilerek analiz edilmiştir.

A. Termal Enerji Performansı ve Doğalgaz Tüketimi

Buhar kürü süreçlerinde uygulanan ısıl izolasyon ve kazan otomasyonu iyileştirmeleri, termal enerji yoğunluğunda belirgin bir düşüş sağlamıştır. İyileştirme öncesi dönemde değişkenlik gösteren ve mevsimsel etkilerle artış eğiliminde olan özgül doğalgaz tüketimi, optimizasyon çalışmaları sonucunda 17 m^3/m^3 seviyesine stabilize edilmiştir.

Verimlilik Artışı: Isıl kayıpların önlenmesi ve yanma verimliliğinin artırılmasıyla, birim beton üretimi için gereken termal enerji ihtiyacında %18'lik bir tasarruf sağlanmıştır.

Kürleme Odası Performansı: Kızılötesi termografi ile yapılan son kontrollerde, kürleme odası cidarlarındaki ısı kaçaklarının %30 oranında azaldığı ve homojen bir sıcaklık dağılımının sağlandığı tespit edilmiştir.

B. Elektrik Enerjisi Tüketim Analizi

Elektrik enerjisi tarafında, özellikle motor sistemlerine entegre edilen Değişken Frekanslı Sürücüler (VFD) ve basınçlı hava hatlarındaki kaçak yönetimi çalışmaları, sistem performansında ölçülebilir iyileşmeler sağlamıştır. Tesisin özgül elektrik tüketimi 13 kWh/m^3 olarak ölçülmüştür.

Pik Yük Yönetimi: Enerji izleme sisteminden alınan veriler, üretim planlamasının enerji yoğun saatlerden kaydırılmasının, tesisin reaktif enerji yükünü dengelediğini ve enerji maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Kompresör Verimliliği: Hava kaçaklarının minimize edilmesi ve işletme basıncının 1,2 bar düşürülmesi, toplam elektrik tüketimi içerisinde basınçlı hava kaynaklı payın %15'ten %11'e gerilemesini sağlamıştır.

C. Kaynak Verimliliği ve Su Geri Kazanımı

Tesisin su ayak izini azaltmaya yönelik kurulan kapalı devre geri kazanım sistemi, kaynak verimliliği açısından en yüksek yüzdeye sahip iyileştirme alanı olmuştur. Başlangıçta daha yüksek seviyelerde seyreden su tüketimi, yapılan filtrasyon ve çöktürme optimizasyonları neticesinde 0,42 m^3/m^3 seviyesine indirilmiştir.

Geri Kazanım Oranı: Üretim süreçlerinde kullanılan suyun yaklaşık %60'ı, çökeltme ve kimyasal şartlandırma sonrası beton karma suyu ve temizlik faaliyetlerinde yeniden kullanılmıştır.

Sürdürülebilirlik Çıktısı: Bu veri, tesisin yeraltı su kaynakları üzerindeki baskısını yıllık bazda önemli ölçüde azaltmış ve "Sıfır Atık Su" hedefine yaklaştırmıştır.

Performans Göstergelerinin Özeti

Tablo 1'de, tesisin iyileştirme sonrası ulaştığı nihai performans göstergeleri ve bu değerlerin teorik baz hatları ile karşılaştırması sunulmaktadır.

Tablo 1. İyileştirme sonrası ulaştığı nihai performans göstergelerini ve bu değerlerin teorik baz hatları ile karşılaştırması

Performans Göstergesi (KPI)	Birim	İyileştirme Öncesi (Ort.)	İyileştirme Sonrası (Ort.)	İyileşme Oranı (%)
Özgül Doğalgaz Tüketimi	m^3/m^3	20,8	17,0	18,2
Özgül Elektrik Tüketimi	kWh/m^3	15,2	13,0	14,4
Özgül Su Tüketimi	m^3/m^3	0,65	0,42	35,3

Elde edilen sonuçlar, endüstriyel veri takibinin ve teknik müdahalelerin birleşimiyle, prefabrik yapı elemanları sektöründe kaynak verimliliğinin %15 ila %35 arasında artırılabileceğini kanıtlamaktadır. Bu bulgular, tesisin çevresel etkilerini minimize ederken operasyonel karlılığını maksimize ettiğini doğrulamaktadır.

D. İyileştirme Uygulamalarının Karbon Ayak İzi ve Su Ayak İzi Açısından Değerlendirilmesi

Tablo 1'de sunulan özgül doğal gaz, elektrik ve su tüketimindeki iyileşmeler, yalnızca işletme verimliliği açısından değil, aynı zamanda çevresel performans açısından da önemli kazanımlar ortaya koymaktadır. Üretim süreçlerinde enerji ve su kullanımındaki azalışlar, üretim sürecine bağlı karbon ayak izi ile su ayak izinin azaltılması bakımından doğrudan etkili göstergeler olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, iyileştirme öncesi ve sonrası tüketim değerleri esas alınarak çevresel kazanımlar karbon ayak izi ve su tüketimi üzerindeki etkileri perspektifinden incelenmiştir.

Karbon ayak izi analizinde, iyileştirme öncesi ve sonrası özgül doğal gaz ile elektrik tüketim değerleri esas alınmış olup birim üretim başına emisyon azaltımı hesaplanmıştır. Tablo 1 verilerine göre, doğal gaz tüketimindeki 3,8 m^3/m^3 düzeyindeki azalışın karbon ayak izi kazanımına katkısı 7,69 $kgCO_2e/m^3$, elektrik tüketimindeki 2,2 kWh/m^3 düzeyindeki azalışın katkısı ise 1,03 $kgCO_2e/m^3$ olarak hesaplanmıştır. Böylece, iyileştirme uygulamaları sonucunda birim üretim başına toplam karbon ayak izi kazanımının 8,72 $kgCO_2e/m^3$ olduğu tespit edilmiştir.

Su tüketimi açısından yapılan değerlendirmede ise, iyileştirme öncesi 0,65 m^3/m^3 olan özgül su tüketiminin iyileştirme sonrası 0,42 m^3/m^3 düzeyine gerilediği görülmüştür. Buna göre, birim üretim başına net su kazanımı 0,23 m^3/m^3, diğer bir ifadeyle 230 L/m^3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, üretim süreçlerinde kullanılan atık suyun yaklaşık %60'ının çökeltme ve kimyasal şartlandırma sonrasında beton karma suyu ve temizlik faaliyetlerinde yeniden kullanılması, bu iyileşmenin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmiştir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışma, prefabrik yapı elemanları üretiminde sistematik izleme ve teknik optimizasyonun, kaynak verimliliği üzerindeki dramatik etkilerini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular;

- Çalışmada ulaşılan 17 m^3/m^3 doğalgaz tüketim değeri, standart üretim protokollerine kıyasla dikkate değer bir iyileşmeyi temsil etmektedir. Betonun erken yaş mukavemetini optimize etmek için kullanılan termal enerjinin, dijital otomasyonla kontrol edilmesi, aşırı kürleme (over-curing) kaynaklı enerji israfını engellemiştir. Literatürde, kürleme sıcaklığındaki her 1°C'lik gereksiz artışın yakıt tüketimini %3-5 oranında artırdığı belirtilmektedir [11]. Bu bağlamda, ulaşılan sonuçlar tesisin termal yönetimde kritik bir eşiği aştığını göstermektedir.
- Elektrik tüketiminde kaydedilen 13 kWh/m^3 değeri ise, tesisin otomasyon seviyesi ile enerji verimliliği arasındaki doğrudan korelasyonu doğrulamaktadır. Özellikle beton santrali mikserlerinde ve vibrasyon masalarında kullanılan verimli motor sistemleri, mekanik kayıpları minimize etmiştir. Ancak bu değerin daha da aşağı çekilmesi, motor sistemlerinin sadece verimli seçilmesiyle değil, üretim döngüsündeki atıl sürelerin (idle time) yapay zeka tabanlı algoritmalarla minimize edilmesiyle mümkün olabilecektir.

- Elde edilen verimlilik artışları operasyonel karbon ayak izini düşürse de, tam bir dekarbonizasyon için yalnızca enerji verimliliği yeterli değildir. Prefabrik elemanların gömülü enerjisinin (embodied energy) büyük bir kısmı çimento üretimi kaynaklıdır. Bu nedenle, enerji verimliliği stratejileri, "*Yeşil Beton*" olarak adlandırılan ve klinker oranı düşük, uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler içeren karışım tasarımlarıyla desteklenmelidir. Bu tür hibrit yaklaşımlar, ürünün yapısal performansından ödün vermeden karbon yoğunluğunu %30-50 oranında azaltma potansiyeline sahiptir.
  - Bu kapsamda yapılan nicel analizler, iyileştirme uygulamalarının yalnızca operasyonel verimliliği artırmadığını, aynı zamanda çevresel performansa da doğrudan katkı sağladığını göstermektedir. Hesaplamalar sonucunda, birim üretim başına toplam karbon ayak izi kazanımının 8,72 $kgCO_2e/m^3$ olduğu, su tüketimindeki iyileşme ile ise birim üretim başına 0,23 m^3 (230 L) su kazanımı sağlandığı belirlenmiştir. Bu bulgular, su geri kazanımı ve proses optimizasyonunun kaynak verimliliği üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.
  - Çalışmanın sonuçları ışığında, prefabrik tesislerinin sürdürülebilirlik rotasını güçlendirmek için şu stratejik adımlar önerilmektedir:
    - ✓ *Yenilenebilir Enerji (GES):* Prefabrik beton elemanları üretimi tesislerinin sahip olduğu geniş çatı alanları, fotovoltaik (GES) sistemler için ideal bir platform sunmaktadır. Tüketilen 13 kWh/m^3 elektriğin önemli bir kısmının yerinde üretilmesi, tesisin enerji bağımsızlığını artıracaktır.

- ✓ *Atık Isı Geri Kazanımı:* Buhar jeneratörlerinin baca gazından elde edilecek atık ısının, karma suyunun ön ısıtılmasında kullanılması, doğalgaz tüketimini mevcut 17 m^3 seviyesinden daha da aşağı çekebilir.
- ✓ Döngüsel Ekonomi: Su geri kazanımında elde edilen 0,42 m^3 başarı, atık beton agregalarının da üretim sürecine geri kazandırılmasıyla (recycled aggregates) bütüncül bir döngüsel model haline getirilebilir.
- ✓ Sonuç olarak, veri temelli enerji, ısı ve su yönetimi, prefabrik yapı elemanları sektöründe sürdürülebilirliğin anahtarıdır. Bu çalışmada sunulan teknik optimizasyonlar, yalnızca maliyet avantajı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda sektörün Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi uluslararası regülasyonlara uyum sürecini hızlandırmaktadır. Bu iyileştirme yöntemlerinin diğer üretim tesislerine ölçeklendirilmesi, inşaat endüstrisinin toplam karbon yoğunluğunu azaltmada kritik bir rol oynayacaktır.

V. ÇIKARIM

Sonuç olarak, veri temelli enerji, ısı ve su yönetimi uygulamaları, prefabrik yapı elemanları sektöründe hem kaynak verimliliğinin artırılması hem de sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesi açısından stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, iyileştirme uygulamalarının ekonomik kazanımların yanı sıra karbon ayak izi ve su tüketimi açısından da somut faydalar sağladığını göstermektedir. Söz konusu uygulamaların farklı üretim tesislerine ölçeklenebilir biçimde yaygınlaştırılması, sektörün uluslararası sürdürülebilirlik düzenlemelerine uyumunu güçlendirebilir ve inşaat endüstrisinin karbon yoğunluğunun azaltılmasına katkı sunabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine olanak sağlayan, veri toplama ve saha uygulama süreçlerinde vizyoner bir yaklaşımla kapılarını açarak endüstriyel sürdürülebilirliğe katkı sunan Betonel Prefabrik Beton Elemanları San. ve Tic. A.Ş. firmasına; enerji yönetimi stratejilerinin hayata geçirilmesindeki teknik destekleri, çevresel duyarlılığı kurum kültürüyle birleştiren yönetim anlayışları ve akademik bilginin pratikle buluşmasına sağladıkları değerli iş birliği imkanları için en içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] UNEP (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction.
[2] Worrell, E., & Galitsky, C. (2008). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry. Lawrence Berkeley National Laboratory.
[3] Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2015). Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
[4] Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management in production based on the Internet of Things paradigm. IEEE International Conference on Industrial Engineering.
[5] Gündüz, M., & Işık, Z. (2021). Prefabrikasyon ve Sürdürülebilirlik: Kaynak Yönetimi Yaklaşımları. Yapı Teknolojileri Dergisi.
[6] ISO 50001 (2018). Energy management systems — Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
[7] Worrell, E., Galitsky, C., & Price, L. (2008). Energy efficiency improvement opportunities for the cement industry. Lawrence Berkeley National Laboratory.
[8] Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 6220-6238.
[9] Oikonomou, N. K. (2005). Recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 27(2), 315-318.
[10] Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 150-168.
[11] Ait-Cincin, P. C. (2014). High Performance Concrete. CRC Press.
[12] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri. Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, Çevre ve İklim. Erişim linki: https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri . Erişim tarihi: 09.04.2026.
[13] Kurnuç Seyhan, A., & Çerçi, M. (2022). IPCC Tier 1 ve DEFRA Metotları ile Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nin Yakıt ve Elektrik Tüketimi Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(3), 386-397. doi:10.19113/sdufenbed.1061021.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Pratik Duygu Tanıma İçin Klinik EEG ve Beyin Bilgisayar Arayüzü Sistemlerinin Karşılaştırılması

Saja Sawalha[a], Mohammadameen Sawalha[b], Ramazan Aldemir[c], Mahmut Tokmakçı[d]*

[a]Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri/Türkiye.
[b]Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri/Türkiye.
[c]Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, Kayseri/Türkiye.
[d]Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri/Türkiye.

* **Sorumlu Yazar:** 4012230123@erciyes.edu.tr, sawalhasaja4@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, temel duygular (mutluluk, üzüntü, korku, şaşkınlık, öfke gibi) uyarılarak, 18–28 yaş aralığında 31 erkek katılımcının EEG verileri toplanmıştır. Klinik EEG cihazı (EbNeuro_GalileoNT) ile jelli elektrotlarla 19 kanaldan, BBA (Beyin Bilgisayar Arayüzü-OpenBCI_V3) donanımı ile kuru elektrotlarla 8 kanaldan (FP1, FP2, C3, C4, T5, T6, FZ, PZ) veriler kısa videolar eşliğinde kaydedilmiştir. Duyguların EEG kanalları üzerinden ayrımı ve hangi kanalların belirleyici olduğu hem Klinik EEG hem de BBA için istatistiksel analizlerle ortaya konulmuştur. Analizlerde her bir kanalın beş frekans bandında (Delta, Theta, Alpha, Beta ve Gamma) Maksimum frekans değeri (F_max) ve Maksimum güç değeri (G_max) ve Ortalama güç değeri(G_mean) hesaplanmış ve bu parametreler duygu uyaranı kısa video süresindeki EEG kayıtları ile dinlenim halinde nötr duygu uyaranı olan 15 saniyelik "beyaz ekran" süresindeki EEG kayıtları *t-test* istatistik analizi yapılarak anlamlı kanallar ($p < 0.05$) belirlenmiş ve kanal bazında duygu sınıflandırmada en etkili ortak kanallar tespit edilmeye çalışılmıştır. Klinik EEG verilerinde G_max stabilite sağlarken, BBA verilerinde F_max daha yüksek duyarlılık göstermiş, ancak G_mean parametresi her iki sistem için etkisiz olarak elde edilmiştir. Belirlenen sekiz ortak kanal, iki cihazda da pratikte etkin duygu tanımada bir belirteç olabileceği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, az sayıda kanal kullanılarak hem klinik hem taşınabilir EEG sistemlerinde yüksek doğrulukla duyguların tanınabileceğini ve gelecekte pratik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Duygu Tanıma, EEG, Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA), İstatistiksel Analiz, Sinyal İşleme.*

Comparison of Clinical EEG and Brain-Computer Interface Systems for Practical Emotion Recognition

ABSTRACT

In this study, EEG data were collected from 30 male participants aged 18–28 years, with basic emotions (happiness, sadness, fear, surprise, anger) being stimulated. Data were recorded from 19 channels with gel electrodes using a clinical EEG device (EbNeuro_GalileoNT) and from 8 channels (FP1, FP2, C3, C4, T5, T6, FZ, PZ) with dry electrodes using a BCI (Brain-Computer Interface-OpenBCI_V3) device, accompanied by short videos. The differentiation of emotions through EEG channels and the determining factors for each channel were statistically analyzed for both Clinical EEG and BCI. In the analyses, the Maximum Frequency Value (F_max), Maximum Power Value (G_max), and Mean Power Value (G_mean) were calculated for each channel across five frequency bands (Delta, Theta, Alpha, Beta, and Gamma). These parameters were then analyzed using t-tests on EEG recordings with short video durations of emotional stimuli and EEG recordings with a 15-second "white screen" duration of neutral emotional stimuli during rest. Significant channels ($p < 0.05$) were identified, and the most effective common channels for emotion classification were determined. In Clinical EEG data, G_max provided stability, while in BCI data, F_max showed higher sensitivity; however, the G_mean parameter was found to be ineffective for both systems. The eight identified common channels were considered as potentially useful markers for effective emotion recognition in both devices. The results show that emotions can be recognized with high accuracy in both clinical and portable EEG systems using a small number of channels, and that this could be used in practical applications in the future.

Keywords: *Emotion Recognition, EEG, Brain Computer Interface (BCI), Statistical Analysis, Signal Processing.*

I. GİRİŞ

İnsan yaşamının temel yapı taşlarından biri olan duygular, bireyin çevresel değişimlere ve günlük yaşamın getirdiği zorluklara karşı geliştirdiği adaptasyon mekanizmalarının merkezinde yer alır [1, 2]. Literatürde "duygu düzenleme" (emotion regulation) olarak tanımlanan süreç; bireyin karşılaştığı durumlara uygun tepkiler verebilmek adına emosyonel gidişatını bilinçli veya otomatik mekanizmalarla kontrol etmesi esasına dayanır. Psikolojik ve fizyolojik esenliğin korunması ile sosyal etkileşimlerin niteliğinin artırılması, ancak bireyin durumun gerekliliklerine uygun duygusal modülasyonu gerçekleştirebilmesi ile mümkündür. Aksine, bu mekanizmalarda yaşanan aksaklıklar, bireyleri psikopatolojik rahatsızlıklara karşı savunmasız hale getirmektedir [3]. Duygu tanıma teknolojilerinde pratik ve etkili çözümler geliştirmek amacıyla, bu çalışmada anket ile puanlanmış kısa duygusal videolar kullanılarak; klinik EEG ve taşınabilir BCI sistemlerinden elde edilen sinyaller karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, EEG kanallarının duyguların tespitindeki belirleyiciliğini inceleyerek, pratikte hangi kanalların duygu tanımada etkin olduğunu ortaya koymaktır. Cihazlar arası ölçüm sürecindeki 14 günlük zaman farkı dikkate alınarak, verilerin tutarlılığı ve katılımcı adaptasyonu üzerine özel bir veri düzenleme ve dosya isimlendirme protokolü geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, az sayıda kanal kullanılarak hem klinik hem de taşınabilir EEG sistemlerinde yüksek doğrulukla duygu tanıma potansiyelini literatüre kazandırmayı hedeflemektedir [4, 5, 6]. EEG sinyallerinin zamansal (time domain) ve frekanssal (frequency domain) analizleri, emosyonel tepkilerin sinirsel karşılıklarını anlamada kritik öneme sahiptir Örneğin, Klimesch ve arkadaşları, alfa (8-13 Hz) ve teta (4-7 Hz) bantlarındaki aktivitenin bilişsel ve emosyonel süreçleri yansıttığını ortaya koymuştur. Özellikle frontal loblardaki EEG asimetrisi, pozitif ve negatif duygusal valansları ayırt etmede yüksek prediktif güce sahiptir [7,8]. Knyazev'in çalışmaları ise, delta dalgalarının (1-4 Hz) içe dönük emosyonel durumlar ve motivasyon süreçleriyle korele olduğunu göstermiştir [9]. Zamansal ve frekanssal analizlerin kombinasyonu olarak Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) kullanımı artmıştır. Dalgacık dönüşümü, EEG sinyalindeki geçici ve geçiş aşamalarını yüksek çözünürlükte ortaya çıkararak duygusal dalgalanmaların hassas tanımlanmasına olanak sağlar. Özellikle Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN), EEG sinyallerinden otomatik özellik çıkarımı yaparak sınıflandırma doğruluğunu artırmıştır. Güncel literatürde Soleymani ve arkadaşları EEG ile birlikte yüz ifadeleri ve galvanik deri tepkisi gibi multimodal verilere entegre ederek %85'in üzerinde artan doğruluk oranları sunmuştur [10]. Li ve arkadaşları, EEG'den çıkarılan zaman-frekans özelliklerini ve eş zamanlı yüz ifadesi verilerini, dikkat mekanizması içeren Transformer modelleriyle analiz ederek multimodal duygu tanıma başarısını %7–10 oranında artırmıştır [11]. Zhang ve arkadaşları ise DEAP veri seti üzerinde yaptıkları çalışmada, EEG sinyallerinde uzamsal ve zamansal özellikleri derin öğrenme ile çıkarıp CNN-LSTM modeli ile sınıflandırma yapmış ve %91 doğrulukla olumlu/olumsuz duyguları ayırt etmiştir; ancak bu çalışma daha çok offline sınıflandırmaya odaklanmıştır [12]. Park ve arkadaşları ise, sanal gerçeklik ortamında EEG ve yüz ifadesi verilerini hibrit olarak entegre etmiş ve derin öğrenme teknikleriyle multimodal veriyi analiz ederek tanıma doğruluğunu artırmıştır [13]. Bu çalışmalar karmaşık yazılımsal modellere odaklansa da mevcut çalışma hesaplama maliyetini düşürmek için kanal seçimi (channel selection) optimizasyonuna odaklanarak literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca Nguyen ve ekibi [14] gerçek zamanlı sistemler için biyometrik entegrasyonun önemini vurgularken, Torres ve ark. [15] taşınabilir BCI cihazlarının klinik sistemlere güvenilir bir alternatif olduğunu doğrulamıştır. Klimesch'in öncülüğünde yapılan çalışmalarda, teta ve alfa bant aktivitelerinin emosyonel süreçlerde belirleyici olduğu; frontal EEG asimetrisinin pozitif ve negatif valanslı duyguları ayırt etmekte yüksek potansiyel taşıdığı ortaya konmuştur [7]. Knyazev ve arkadaşları delta aktivitesinin içe dönük emosyonel durumlar ve motivasyon süreçleriyle ilişkili olduğunu bildirmiştir [9]. Bu çalışma, klinik EEG ve taşınabilir BBA cihazlarından elde edilen verilerin karşılaştırmalı analizini yaparak, iki sistem arasındaki ilişkisini ve duyguların tespitindeki benzerliklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Böylece, az sayıda kanal kullanımıyla duygu tanımada yeni nesil uygulamalara pratik bir temel oluşturulması hedeflenmiştir.

II. MATERYAL METOT

2.1 Kullanılan Veri Seti: Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sinyal kayıt aşamasında kullanılan materyaller ve veri işleme sürecinde uygulanan metotlar açıklanmıştır. Araştırmanın veri seti, kontrollü deney ortamında kaydedilen EEG sinyallerinden oluşmaktadır. Veriler, (EbNeuro_GalileoNT) ve (OpenBCI_V3) olmak üzere iki farklı cihaz kullanılarak toplanmıştır. Toplama işlemi, Erciyes Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylanmış protokole uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde katılımcılara çalışma hakkında ayrıntılı bilgilendirme yapılmış ve yazılı onamları alınmıştır. Kullanılan cihazların teknik özellikleri ile oluşturulan deneysel veri setine ilişkin ayrıntılı parametreler Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Veri Setinin Karakteristik Özellikleri

Parametre	Klinik EEG (EBNeuro)	BBA (OpenBCI)
Katılımcı Sayısı	31 Erkek	31 Erkek (28'si aynı, 3 katılımcı farklı)
Kanal Sayısı	19	8
Video Sayısı (Her Katılımcı İçin)	5	5
Örnekleme Frekansı	256	250
Veri Seti Sınıflandırma Sayısı	5	5
Sınıflandırma İsimleri	Mutluluk, Üzüntü, Korku, Şaşkınlık, Öfke	Mutlu, Korku, Üzgün, Öfkeli, Korkunç
Sayısal Veri Miktarı	5 video × 19 kanal × 31 katılımcı	5 video × 8 kanal × 31 katılımcı
Veri Formatı	EDF (European Data Format)	TXT
Katılımcı Yaş Aralığı	18-28	18-28
Kodlama ve Elektrot türü	WEK : Islak Elektrot (Klinik EEG)	DEB: Kuru Elektrot (Taşınabilir BBA)

2.2 Katılımcı Özellikleri : Araştırma grubuna yaş aralığı 18–28 olan toplam 31 sağlıklı erkek gönüllü dahil edilmiştir. Katılımcılar rastgele örnekleme yöntemiyle seçilmiş olup dahil edilme kriterleri şu şekilde belirlenmiştir: Herhangi bir nörolojik veya psikiyatrik rahatsızlık öyküsünün bulunmaması düzenli ilaç kullanımının olmaması ve normal işitsel/görsel algı kapasitesine sahip olunmasıdır. Ayrıca EEG/BBA kayıtları sırasında uzun süre hareketsiz kalmaya engel teşkil edecek fiziksel bir kısıtlamanın bulunmamasına dikkat edilmiştir. Deney protokolü kapsamında klinik EEG kayıtlarına 31 katılımcı dahil edilmiş; 14 günlük süre farkının ardından yapılan taşınabilir BBA kayıtlarında ise sinyal tutarlılığını korumak amacıyla bu gruptan 28 katılımcı ile devam edilmiştir. Eksilen 3 katılımcının yerine aynı kriterlere uygun yeni gönüllüler eklenerek veri seti tamamlanmıştır.

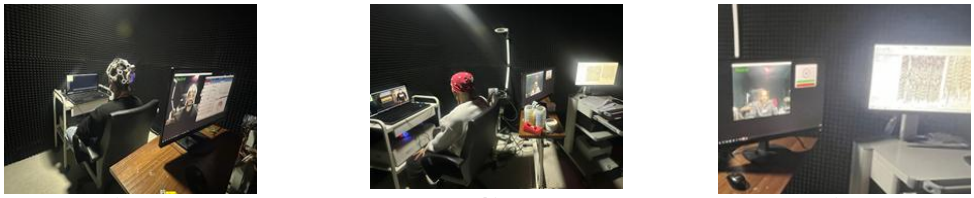
2.3. Deney Prosedürü ve Veri Toplama Protokolü: Sinyal kayıtları, elektromanyetik parazitleri minimuma indirmek amacıyla Faraday kafesi ile izole edilmiş özel bir deney odasında gerçekleştirilmiştir. Faraday kafesi, iletken metal kaplaması sayesinde dış ortamdan gelebilecek elektromanyetik girişimlerin EEG sinyallerini etkilemesini engellemektedir. Deney süreci iki temel aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada EbNeuro_GalileoNT (19 elektrot, 256 Hz) sistemi ile klinik veriler toplanmış; 14 günlük bir adaptasyon arasının ardından aynı protokol ile OpenBCI_V3 (8 elektrot: FP1, FP2, C3, C4, T5, T6, FZ, PZ, 250 Hz) kayıtları gerçekleştirilmiştir. Cihazlar arası bırakılan 14 günlük fark ‹katılımcıların videolara verdiği tepkilerin tutarlılığını ve sinyal adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla özel bir protokol olarak sunulmuştur. Her katılımcı için toplam kayıt süresi yaklaşık 15 dakikadır. Bu süreçte katılımcılara ‹anket ile puanlanmış 5 duygusal ve 6 nötr video (toplam 11 segment) izletilmiştir. Katılımcı verileri gizlilik esasına göre anonimleştirilerek saklanmış ve yalnızca çalışma ekibinin erişimine açık tutulmuştur.

2.4. Deney Kapsamı ve Uyaranlar: Araştırma kapsamında katılımcılara; mutluluk, üzüntü, korku, şaşkınlık, öfke duygularını tetiklemek amacıyla belirlenen beş farklı video gösterilmiştir. Bu videoların sunum sırası her iki cihaz (EEG ve BCI) kaydında da sabit tutulmuştur. Videolar arasında katılımcıların duygu durumlarını nötralize etmeleri ve odaklanmalarını sağlamak amacıyla dinlenme araları verilmiştir. Gösterim sırasında katılımcı ile ekran arasındaki mesafe yaklaşık 40 cm olarak sabitlenmiş ve çevresel faktörler standardize edilmiştir. Deney sırasında kullanılan görsel uyaranların akışı ve süreleri Şekil 1'de detaylandırılmıştır.



Şekil 1. Deney Prosedürü

2.5. Katılımcı Yerleşimi ve Artefakt Kontrolü: Sinyal kalitesini artırmak ve kas aktivitesi kaynaklı artefaktları minimuma indirmek amacıyla katılımcılar, ergonomik sandalyelere oturtulmuştur. Deney boyunca katılımcıların baş ve göz hareketlerini kısıtlamaları, gevşek bir pozisyonda kalmaları istenmiştir Katılımcının deney odasındaki yerleşimi, ekran mesafesi ve elektrot bağlantı düzeni Şekil 2'de görsel olarak sunulmuştur.



a) b) c)

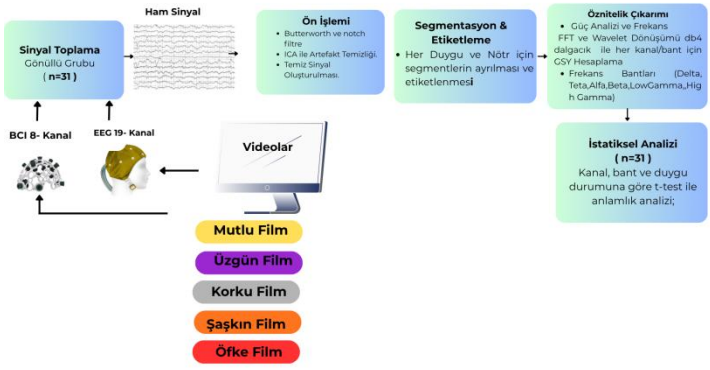
Şekil 2. Deneysel Veri Toplama Aşamalarında Kullanılan Ortamlar: (a) BBA düzeneği, (b) Klinik EEG (EbNeuro) sistemi ve Faraday kafesi yerleşimi, (c) Kamera tabanlı anlık duygu tespiti ve sinyal takip arayüzü.



a)Mutluluk [16] b)Üzüntü [17] c)Korku [18] d)Şaşkınlık [19] e)Öfke [20]

Şekil 3. Deney Protokolünde Kullanılan Duygusal Uyaranlara Ait Videolar: (a), (b), (c) , (d) ,(e) duygularını temsil etmektedir. *(Orijinal video bağlantıları için Kaynaklar bölümüne bakınız [16,17, 18, 19,20])* .

2.6 EEG / BCI Verilerinin Toplanması ve Ön İşleme: Bu çalışmada beyin sinyalleri uluslararası 10–20 elektrot yerleşim sistemine uygun olarak klinik EEG (19 kanal) ve taşınabilir BBA (8 kanal) cihazları ile standartlara bağlı kalınarak kaydedilmiştir. Kayıt süreçleri yüksek örnekleme frekansı ve elektromanyetik izolasyon ile optimum veri kalitesini sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla elde edilen ham sinyallere çok aşamalı bir ön işleme (preprocessing) protokolü uygulanmıştır. Aşağıda bu adımlar ayrıntılı şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4. EEG/ BCI Sistem Mimarisi ve Veri Akış

Araştırmada elde edilen veriler, MATLAB ortamında dijital sinyal işleme teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, 31 gönüllüden alınan 19 kanallı klinik EEG ve 8 kanallı taşınabilir BCI sistemine ait ham veriler işlenmiştir. Sistemler arası metodolojik uyumluluğu sağlamak amacıyla, klinik EEG sinyalleri 200 Hz'den 256 Hz'e yeniden örneklenmiş (resampling); taşınabilir BBA sistemi ise 250 Hz örnekleme hızında analiz edilmiştir. Metodolojik akışın ilk aşamasında, ham sinyallerdeki artefaktları gidermek ve analiz aralığını belirlemek için 0.5-100 Hz Bant Geçiren Filtre (Band-Pass Filter) ve 50 Hz şebeke gürültüsünü yok etmek amacıyla Çentik Filtre (Notch Filter) uygulanmıştır. Tüm filtreleme işlemleri Butterworth filtre tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, göz kırpma gibi biyolojik artefaktlar Bağımsız Bileşen Analizi (ICA) yöntemiyle temizlenerek güvenilir veri segmentleri oluşturulmuş ve her duygu durumu için etiketlenmiştir. Öznitelik çıkarımı aşamasında, sinyallerin frekans içeriğini analiz etmek için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Spektral bileşenleri incelemek amacıyla uygulanan Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) ifadesi Denklem 1'de sunulmuştur. Bu kapsamda uygulanan Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) ifadesi Denklem 1'de sunulmuştur.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad , K = 0, \dots, N-1 \qquad (1)$$

N : Toplam örnek sayısı. k: frekans indeksi. j sanal birimdir

Bu dönüşüm sayesinde sinyalin frekans spektrumu ve Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama gibi bantlar analiz edilmiştir.

Dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform-WT): zaman-frekans çözünürlüğünü birlikte sağlayabilen, non-stasyoner sinyallerin analizine uygun bir yöntemdir. Çalışmada Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform -DWT) yaklaşımı kullanılmıştır. Durağan sinyallerdeki ani değişimleri yakalamadaki başarısı nedeniyle Daubechies 4 (db4) ana dalgacığı tercih edilmiş [21]. Sürekli Dalgacık Dönüşümü, teorik olarak aşağıdaki Denklem 2'de tanımlanır.

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*_{b,a}(t)\,dt \qquad (2)$$

W(a,b): ölçek ve kaydırma parametrelerine göre dalgacık katsayıları.
ψ(t): ana dalgacık fonksiyonu. a: ölçek parametresi. b: kaydırma parametresi.∗: kompleks eşlenik işareti.

Dalgacık analizi sürecinde ise Daubechies 4 (db4) ana dalgacığı kullanılarak 6 seviyeli bir ayrıştırma yapılmıştır. Örnekleme frekanslarındaki küçük farklar (256 Hz vs 250 Hz), alt bant sınırlarında mikro düzeyde kaymalara (frequency shifting) neden olsa da; her iki sistem için de 6. seviye ayrıştırma korunarak Delta (0.5–4 Hz), Teta (4–8 Hz), Alfa (8–13 Hz), Beta (13–32 Hz), Alçak Gama (32–50 Hz) ve Yüksek Gama (50–100 Hz) bantlarına en yakın değerler elde edilmiştir. Her bir bant için Dalgacık katsayılarından yararlanılarak frekans bileşenleri ayrıştırılmış ve ardından Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) bilgileri hesaplanmıştır; G_max (maksimum güç), G_mean (ortalama güç) ve F_max (maksimum frekans) gibi kritik öznitelikler elde edilmiştir. Son aşamada elde edilen veriler kanal bant ve duygu durumuna göre t-testi kullanılarak istatistiksel analiz ile değerlendirilmiş ve sistemler arası anlamlılık karşılaştırmaları yapılarak çalışmanın sonuçları oluşturulmuştur. Elde edilen güç değerleri hem grafiksel olarak sunulmuş hem de cihazlar arasındaki tutarlılığı belirlemek amacıyla duygusal durumlar ile nötr segmentler arasında karşılaştırmalı istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

2.7 İstatistiksel Veri İşleme ve Karakteristik Kanal Belirleme Metodolojisi: Çalışma kapsamında elde edilen bulgular F_max ve G_max duyguya özgü en kararlı bileşenleri tanımlamak amacıyla iki aşamalı bir "Ayıklama ve Sistemler Arası Doğrulama" stratejisiyle işlenmiştir. Duyguya Özgü Ayırt Edici Kanalların Belirlenmesi, Her bir donanım (Klinik EEG ve BBA) için oluşturulan özet tablolarda "Tekillik" (Uniqueness) ilkesi temel alınmıştır. Bu aşamada belirli bir frekans bandında birden fazla duygu uyarımıyla (video) ilişkilendirilen kanallar elenerek; yalnızca ilgili duyguya has dikey eksende tekrarlanmayan ve o duyguyu karakterize eden "Ayırt Edici Kanallar" seçilmiştir. Bu işlem her duygu durumu için münferit bir spektral imza oluşturulmasını sağlamıştır. Cihazlar arası ortak kanal validasyonu için tablo oluşturulurken $p < 0.05$ anlamlılık düzeyine sahip istatistiksel veriler temel alınmıştır. Her iki sistemde (Klinik EEG ve BBA) eş zamanlı olarak anlamlılık sergileyen kanal ve bant kombinasyonları "Kesişim Kümesi" (Intersection) yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, bağımsız bir doğrulama sağlayarak donanımdan bağımsız en güvenilir biyobelirteçlerin saptanmasına olanak tanımıştır.

III. SONUÇLAR

19 kanallı EEG cihazı ile kaydedilen verilerin analizinde hem spektral güç G_max hem de frekans kaymaları F_max parametreleri kullanılarak elde edilen anlamlı kanal ve bant dağılımları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. 19 Kanallı EEG sisteminden elde edilen verilerin G_max ve F_max parametrelerine göre istatistiksel analiz sonuçları

Duygu	İstatistiksel Anlamlı Kanallar/Bantlar (G_MAX)	İstatistiksel Anlamlı Kanallar/Bantlar (F_MAX)
Mutluluk	C3, C4, P4(Delta)	FP1,T6(Alpha);T6(Gamma)
Üzüntü	PZ(Delta); FP2, T3(Gamma)	PZ(Delta);FP2,F7,F3,FZ,T3,CZ,P3,O1(Alpha)
Korku	FP2(Delta); F4,O2(Alpha)	***
Şaşkınlık	T4(Beta); F7,FZ(Gamma)	F3,T4,P3(Gamma)
Öfke	T4(Theta)	FP2,C4,T5,T6(Gamma)

19 kanallı EEG verileri üzerinde yapılan analizler temel duyguların nöral izdüşümlerinin literatürle tam bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda Mutluluk duygusu sensorimotor (C3, C4) ve parietal (P4) Delta aktivitesi ile frontal-temporal (Fp1, T6) Alfa/Gama modülasyonu üzerinden tanımlanmıştır. Üzüntü Pz (Delta) odağının yanı sıra geniş bir ağda (Fp2, F7, F3, Fz, T3, Cz, P3, O1) gözlenen yaygın Alfa aktivasyonuyla "bilişsel geri çekilme" sürecini yansıtmıştır. Korku durumu görsel ve frontal (Fp2, F4, O2) bölgelerdeki Alfa/Delta değişimleriyle karakterize edilirken; Şaşkınlık (T4, F7, Fz, F3, P3) ve Öfke (T4, Fp2, C4, T5, T6) durumları ani nöral uyarılmışlığın göstergesi olan yüksek frekanslı Gama ve Beta salınımlarıyla öne çıkmıştır. Sonuç olarak her iki parametre G_max ve F_max üzerinden elde edilen bu veriler 19 kanallı sistemin duygusal durumları haritalandırmadaki yüksek hassasiyetini kanıtlamaktadır.

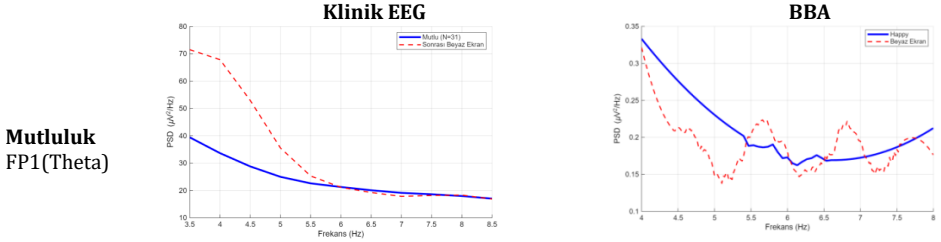
Sekiz ortak kanal (FP1, FP2, C3, C4, T5, T6, FZ, PZ) üzerinden Klinik EEG ve Taşınabilir BBA donanımlarının duygu tanıma performansı F_max parametresi bazında karşılaştırılmıştır. Her iki ölçüm sisteminin (Klinik

EEG ve BBA) duygu uyarımı sırasında gösterdiği ortak karakteristik tepkiler ve yüksek korelasyon sergileyen kanallar Tablo 3'te özetlenmiştir.

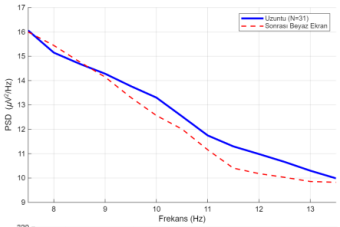
Tablo 3. Klinik EEG ile BBA'nın Maksimum Frekans (F_MAX) parametresinin İstatistiksel anlamlı Kanalları ve Frekans Bantları ile hem Klinik EEG ve hem de BBA'da İstatistiksel anlamlı olan kanallar ve frekans bandları Özet tablosu.

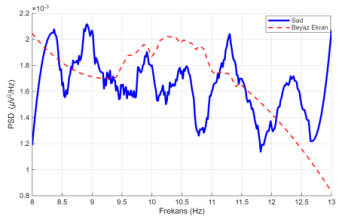
Duygu/(f_max)	**Klinik EEG için anlamlı Kanallar ve Bantlar**	**BBA için anlamlı Kanallar ve Bandlar**	**Klinik EEG ve BBA'da her ikisinde anlamlı ortak kanallar ve bandları**
Mutluluk (Video 1)	FP2,T6,FZ (Delta); **FP1**,FP2(**Theta**); T6 (Gamma)	FP1, PZ (Delta); **FP1**(**Theta**); FP1, T6(Alpha); FP1,FP2,C3,C4,T5,T6,FZ(Beta); FP1,FP2(Gamma)	FP1(Theta)
Üzüntü (Video 2)	FP2 (Beta); **FZ(Alpha)**	FP1(Delta); **FZ (Alpha)**	FZ(Alpha)
Korku (Video 3)	**FP1**,FP2,**C4**,T6,FZ (**Delta**); FP1,**FP2,FZ** (**Theta**); FP1,C4(Alpha)	**FP1,C4**,PZ (**Delta**); **FP2, FZ(Theta)**; C3,PZ(Alpha)	FP1, C4(Delta); FP2,FZ(Theta)
Şaşkınlık (Video 4)	**C3,C4**,T5,FZ (**Theta**); FP1,**FP2(Beta**); T6(Gamma)	C4,PZ (Delta); FP2,**C3,C4**,PZ (**Theta**); FP1,T5 (Alpha); **FP2**,C4,T5(**Beta**)	FP2(Beta); C3,C4(Theta)
Öfke (Video 5)	FP1,C3,C4,T6,FZ, **PZ (Theta)**; PZ(Alpha)	C3(Delta); **PZ(Theta)**; T6(Gamma)	PZ(Theta)

3.1 Duygu Durumları: FP1 kanalındaki Theta bandı verileri incelendiğinde; her iki sistemin de dinlenme ve duygu uyarımı durumları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar/değişimler sergilediği gözlenmiştir. Klinik EEG ve BBA sistemlerinden elde edilen bu spektral değişimler, Theta bandının duygusal aktivasyonu yansıtmadaki hassasiyetini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, her iki cihaz da Theta bandı üzerinden dinlenme ve duygu durumlarını birbirinden ayırmada birbiriyle tutarlı ve ayırt edici sonuçlar vermiştir [22]. FZ kanalındaki Alpha bandı analizinde, her iki cihazda da (Klinik EEG ve BBA) üzüntü uyarımı sırasında spektral gücün dinlenme durumuna göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Literatürle tam uyumlu olan bu frontal alfa artışı (Alpha Power Increase), beynin hüzün gibi içsel süreçlerde 'duygusal geri çekilme' ve bilişsel 'inhibisyon' (baskılama) fazına girdiğini kanıtlamaktadır. Özellikle Klinik EEG'deki stabil artış ile BBA'daki belirgin spektral ayrışma, her iki sistemin de hüzün duygusunun nörolojik izlerini başarıyla yakaladığını doğrulamaktadır [8]. Korku uyarımı sırasında her iki cihazda da Fz, Fp1, Fp2 ve C4 kanallarında Delta ve Theta enerji artışı gözlenmiştir. Fp1 ve Fp2 (Prefrontal) bölgelerindeki bu artış, tehlikeye karşı gelişen derin duygusal odaklanmayı (immersion) ve sağ hemisfer odaklı negatif geri çekilme (withdrawal) mekanizmasını yansıtmaktadır[8]. Orta hat üzerindeki Fz kanalındaki aktivite, savunma amaçlı uyanıklık ve dikkat yoğunlaşmasını simgelerken; C4 (Santral) bölgesindeki değişim, korku anındaki içgüdüsel ve motor teyakkuz halini göstermektedir. Bu spektral değişimler, beynin korku uyaranını işleme sürecindeki koordineli kortikal tepkisini literatür ile tam uyumlu şekilde ortaya koymaktadır. Surprise (Şaşkınlık) uyarımı sırasında her iki sistemde C3, C4 ve Fp2 kanallarında Theta ve Beta bantlarında belirgin bir enerji artışı saptanmıştır. Sol ve sağ merkez bölgelerdeki (C3 ve C4) Theta artışı, ani gelişen olayın zihinsel ve duygusal olarak anlamlandırılma sürecini ve sensorimotor teyakkuz halini yansıtmaktadır. Sağ frontal bölgedeki (Fp2) Beta artışı ise negatif uyarana karşı gelişen yüksek dikkat ve uyarılma (arousal) durumunun somut bir göstergesidir. Bu spektral değişimler, beynin her iki yarım küresinin beklenmedik durumlara karşı koordineli bir bilgi işleme ve duygusal tepki kapasitesi sergilediğini kanıtlamaktadır [7]. Öfke uyarımı sırasında her iki sistemde Pz kanalında Theta bandı enerji miktarının dinlenme haline göre belirgin ve stabil bir artış gösterdiği saptanmıştır. Arka-orta bölgedeki (Parietal) bu teta artışı, kişinin öfke odağına karşı yüksek bir uyarılma (arousal) ve dikkat performansı sergilediğini kanıtlamaktadır. Her iki sisteme (BBA ve Klinik EEG) ait tüm duygu durumlarının karşılaştırmalı PSD analiz grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

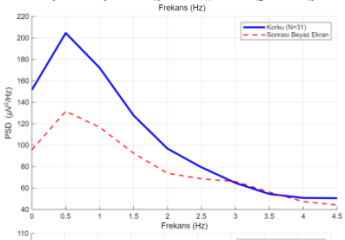


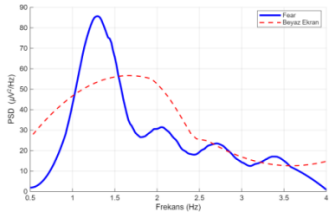
Üzüntü
FZ(Alpha)



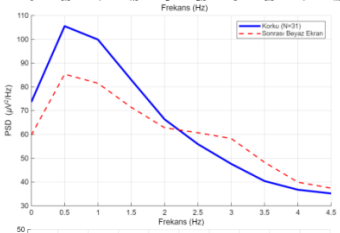


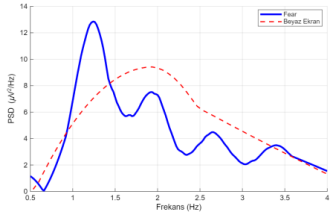
Korku
FP1(Delta)



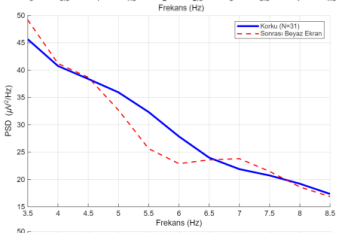


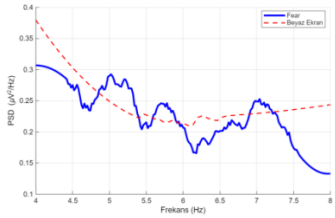
Korku
C4(Delta)



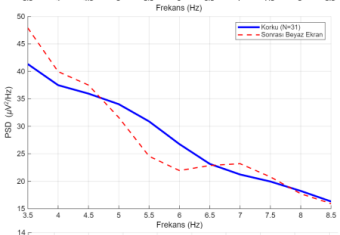


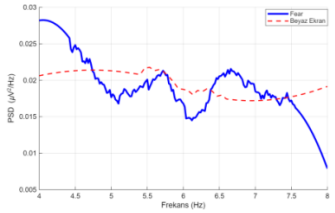
Korku
FP2(Theta)



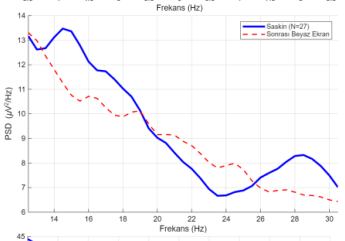


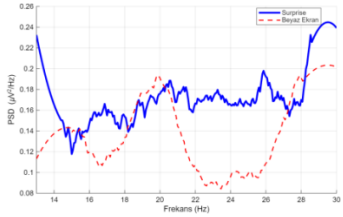
Korku
FZ(Theta)



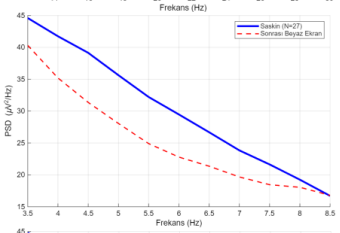


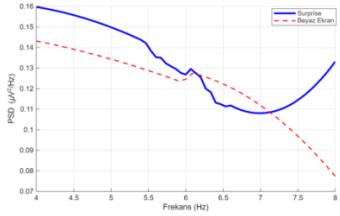
Şaşkınlık
FP2(Beta);



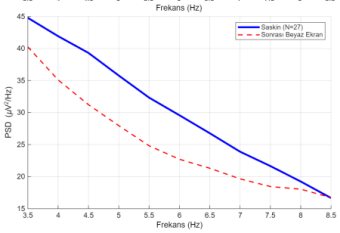


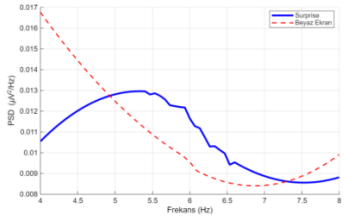
Şaşkınlık
C3(Theta)



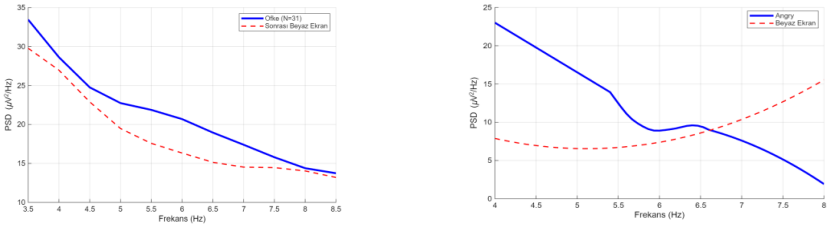


Şaşkınlık
C4(Theta)





Öfke
PZ(Theta)



Şekil 5. Klinik EEG ve BBA Sistemine ait istatistiksel anlamlı ortak kanalların dinlenim durumu (Beyaz ekran) ile karşılaştırmalı olarak F_MAX Grafiklerinin gösterimi

IV. TARTIŞMA

Bu çalışma 19 kanallı klinik EEG ve 8 kanallı taşınabilir BBA sistemlerinin duygu tanıma performanslarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular cihazların teknik yapılarına ve kanal sayılarına göre farklı parametrelerin ayırt edici güçlerinin değiştiğini göstermiştir. Klinik EEG sisteminde G_max (Maksimum Genlik) parametresi duygu değişimlerini en hassas şekilde yansıtırken; kısıtlı kanal sayısına sahip taşınabilir BBA sisteminde F_max (Maksimum Frekans) parametresinin gürültüye karşı daha dirençli ve kararlı sonuçlar verdiği saptanmıştır. Çalışmada uygulanan beyaz ekran standardizasyonu ve Faraday kafesi kabininin kullanımı gibi deneysel önlemler elektromanyetik gürültüyü minimize ederek sinyallerden duyguların ayrıştırılabilirliğini artırmıştır. Analizler kısıtlı 8 kanal kullanımına rağmen her iki cihazın da duygu durumlarını karakteristik frekans bantları üzerinden yakalayabildiğini doğrulamaktadır. Bu durum taşınabilir BBA sistemlerinin klinik ortam dışındaki gerçek zamanlı duygu izleme uygulamalarında güvenilir olabileceğini göstermektedir. Özellikle kanal azaltımı (channel reduction) yaklaşımıyla odaklanılan stratejik ortak kanallarda elde edilen başarı duygusal tepkilerin tespit edilmesi için çok sayıda elektrota ihtiyaç duyulmadığını kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar minimalist bir kanal konfigürasyonuyla tasarlanan 8 kanallı BBA sisteminin hem veri işleme yükünü azalttığını hem de klinik cihazlarla istatistiksel olarak paralel ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır.

V. ÇIKARIM

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında şu temel çıkarımlara varılmıştır Bu çalışma, ‹kısıtlı kanal konfigürasyonuna sahip taşınabilir beyin-bilgisayar arayüzlerinin (BBA) duygusal durum tespiti üzerindeki yüksek potansiyelini ve klinik cihazlarla olan spektral tutarlılığını ortaya koymuştur. Elde edilen veriler ışığında çalışmanın bilimsel katkısını derinleştirmek ve uygulama alanlarını genişletmek adına gelecekte şu perspektiflerin izlenmesi önerilmektedir. Mevcut bulguların evrensel bir geçerlilik kazanması amacıyla daha geniş bir popülasyonu temsil eden farklı yaş ve cinsiyet gruplarından oluşan katılımcı spektrumları ile çalışmaların ölçeklendirilmesi hedeflenmektedir. Çevrimdışı analizlerden elde edilen başarıların gerçek zamanlı (online) duygu tanıma sistemlerine entegre edilmesi ve insan-makine etkileşimi çerçevesinde dinamik kullanıcı arayüzleri üzerinden test edilmesi ileri bir adım olacaktır. Beyin Bilgisayar arayüzünün(BBA) 8 kanallı sisteminden elde edilen bu anlamlı sonuçların mobil sağlık uygulamalarına veya kullanıcı dostu giyilebilir teknolojilere temel oluşturması projenin önemli pratik hedeflerindendir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü bünyesinde gerçekleştirilmiş ve veri toplama süreci Erciyes Üniversitesi Klinik Araştırmalar Araştırma ve Uygulama Merkezi imkânları kullanılarak tamamlanmıştır. Çalışmanın tüm aşamaları, Erciyes Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylanmış protokole uygun biçimde yürütülmüştür. Yazarlar, akademik ve teknik desteklerinden dolayı her iki kuruma da teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] R. J. Dolan, “Emotion, cognition, and behavior,” *Science*, vol. 298, no. 5596, pp. 1191–1194, 2002.
[2] N. Kohn, S. B. Eickhoff, M. Scheller, A. R. Laird, P. T. Fox, and U. Habel, “Neural network of cognitive emotion regulation: An ALE meta-analysis and MACM analysis,” *Neuroimage*, vol. 87, pp. 345–355, 2014.
[3] A. Aldao, S. Nolen-Hoeksema, and S. Schweizer, “Emotion-regulation strategies across psychopathology: A meta-analytic review,” *Clinical Psychology Review*, vol. 30, no. 2, pp. 217–237, 2010.
[4] E. Niedermeyer and F. L. da Silva, *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
[5] F. Lopes da Silva, “EEG and MEG: Relevance to neuroscience,” *Neuron*, vol. 80, no. 5, pp. 1112–1128, 2013.
[6] Z. Mao, X. Zhao, and Y. Song, “Research of EEG-based emotion recognition for the deaf with feature fusion,” *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, vol. 45, no. 3, pp. 216–236, 2024.
[7] W. Klimesch, “EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis,” *Brain Research Reviews*, vol. 29, no. 2-3, pp. 169–195, 1999.
[8] R. J. Davidson, “Anterior electrophysiological asymmetries, emotion, and depression: Conceptual and methodological conundrums,” *Psychophysiology*, vol. 35, no. 5, pp. 607–614, 1998.
[9] G. G. Knyazev, “Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 31, no. 3, pp. 377–395, 2007.
[10] M. Soleymani, G. Chanel, J. J. M. Kierkels, and T. Pun, “Multimodal emotion recognition in response to videos,” *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 3, no. 2, pp. 211–223, 2011.
[11] X. Li, C. Zhang, and Y. Chen, “Multimodal emotion recognition with EEG and facial expressions using transformer models,” *Neurocomputing*, vol. 470, pp. 1–10, 2022.

[12] T. Zhang, W. Zheng, Z. Cui, Y. Zong, and Y. Li, "Spatial–temporal recurrent neural network for emotion recognition from EEG signals," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 51, no. 8, pp. 4201–4214, 2021.
[13] S. Park, H. Kim, and M. Whang, "Multimodal emotion recognition using EEG and facial expression in a virtual reality environment," *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5524, 2021.
[14] T. P. Nguyen and J. Cho, "A BCI-based emotional training system using EEG and biometric signals with real-time visual feedback," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 22552–22563, 2017.
[15] E. P. Torres, E. A. Torres, I. Hernández-Pariño, and J. C. Quiroz, "EEG-based emotion recognition using wearable devices: A systematic review," *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4683, 2020.
[16] The One Academy, "My Love | CGI Animated Short Film," Feb. 14, 2023. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=H4M0Kjsr3_g
[17] Artmoeba Productions, "A Folded Wish | CGI Animated Short Film," Apr. 18, 2020. [Online]. Available: https://youtu.be/9HEkdFzHLHs
[18] J. J. Walker, "THE CELLAR | One Minute Short Horror Film," Sep. 9, 2025. [Online]. Available: https://youtu.be/kF36NNNHVrU
[19] Leo Captured, "SEEN - A 1 Minute Short Film," Oct. 31, 2018. [Online]. Available: https://youtu.be/rMPkUuMq024
[20] Ngọc Hải, "Nightcrawler - Jake Gyllenhaal Angry Scene," Feb. 21, 2016. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=FRPF-7BxKNU
[21] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961–1005, 1990.
[22] G. Pfurtscheller, "Event-related desynchronization (ERD) and related oscillations," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 103, no. 1, pp. 22–30, 1997.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Siber Güvenlikte Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Tabanlı Saldırı Tespit Sistemlerinin Son On Yıldaki Gelişimi (2015-2025)

Fatma Betül Denizli, Ali Çalhan

[a]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** mailto:alicalhan@duzce.edu.tr

ÖZET

Teknolojinin gelişimi ile eş zamanlı olarak siber güvenlikteki tehditler de artış göstermektedir. Klasik imza tabanlı sistemlerin yeni ve değişken saldırılara karşı sınırlı kalması nedeniyle, son on yılda makine öğrenmesine dayalı saldırı tespit sistemleri (ML-based IDS) yoğun bir araştırma odağı haline gelmiştir. Bu çalışma; metodolojik ilerlemelere, veri seti gelişmelerine ve yeni araştırma eğilimlerine odaklanarak, 2015-2025 yılları arasında ML tabanlı IDS yaklaşımlarının evrimine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. Yapılan analiz, erken dönem araştırmalarının öncelikle bilinen saldırılar için tespit doğruluğunu artırmak amacıyla karar ağaçları, destek vektör makineleri ve topluluk modelleri gibi denetimli öğrenme tekniklerine dayandığını ortaya koymaktadır. Takip eden süreçte, etiketli verilerin sınırlılıklarını gidermek ve sıfırıncı gün (zero-day) tehditleri tespit edebilmek amacıyla odak noktası denetimsiz öğrenme ve anomali tespit yöntemlerine kaymıştır. Son yıllarda gerçek dünya uygulanabilirliği ve özyinelemeli sinir ağlarını (RNN) da kapsayan derin öğrenme yaklaşımları, ağ trafiğindeki karmaşık kalıpları yakalamada yüksek performans sergilemiştir. Bu ilerlemelere rağmen; veri dengesizliği, hesaplama maliyeti ve dağıtım kısıtlamaları gibi zorluklar kritik önemini korumaktadır. Bu çalışma, makine öğrenmesi tabanlı saldırı tespit sistemlerinin gelişimini yapılandırılmış bir şekilde inceleyerek metodolojik değişimleri ortaya koymakta ve gelecekteki araştırmalar için kritik öncelikleri belirlemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Saldırı Tespit Sistemleri (IDS), Makine öğrenmesi tabanlı güvenlik, Derin öğrenme, Siber güvenlik, Anomali tespiti.*

AI in Cybersecurity: A Decade Review of Machine Learning-Based Intrusion Detection Systems (2015-2025)

Fatma Betül Denizli[a], Ali Çalhan[a]

[a]Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
*Corresponding Author: mailto:alicalhan@duzce.edu.tr

ABSTRACT

Cybersecurity threats have been escalating concurrently with technological advancements. As traditional signature-based systems remain limited against novel and evolving attacks, machine learning-based intrusion detection systems (ML-based IDS) have become a focal point of research over the past decade. By focusing on methodological advancements, dataset developments, and emerging research trends, this study provides a comprehensive review of the evolution of ML-based IDS approaches between 2015 and 2025. The analysis reveals that early-stage research primarily relied on supervised learning techniques, such as decision trees, support vector machines, and ensemble models, to improve detection accuracy for known attacks. Subsequently, the focus shifted toward unsupervised learning and anomaly detection methods to address the limitations of labeled data and to detect zero-day threats. In recent years, deep learning approaches- including recurrent neural networks (RNNs)- have demonstrated high performance in capturing complex patterns in network traffic, alongside improved real-world applicability. Despite these advancements, challenges such as data imbalance, computational cost, and deployment constraints remain critically important. By examining the development of machine learning-based intrusion detection systems

in a structured manner, this study highlights key methodological shifts and identifies critical priorities for future research.

Keywords: *Intrusion Detection Systems (IDS), Machine learning-based security, Deep learning, Cybersecurity, anomaly detection.*

I. GİRİŞ

Dijital dönüşümün hızlanmasıyla beraber ağa bağlı sistemlerin sayısı, çeşitliliği ve birbirine bağımlılığı her geçen yıl artmakta; bu durum siber tehdit yüzeyini önemli ölçüde genişletmektedir [1], [2]. Bulut bilişim (Cloud Computing), Nesnelerin İnterneti (IoT), endüstriyel kontrol sistemleri ve yazılım tanımlı ağlar (SDN) gibi yeni teknolojiler, klasik kurumsal ağlardan farklı tehdit modellerini beraberinde getirmiştir [3], [4]. ENISA ve benzeri uluslararası kuruluşların raporları, fidye yazılımı, gelişmiş kalıcı tehditler (APT), DDoS ve botnet saldırılarındaki artışın 2015 sonrasında belirgin biçimde hızlandığını ortaya koymaktadır [5].

Geleneksel imza tabanlı saldırı tespit sistemleri (SIDS), bilinen saldırıları yüksek doğrulukla tespit etmesine rağmen, daha önce karşılaşılmamış (zero-day) tehditler ve polimorfik kötü amaçlı yazılımlar karşısında temel bir sınırlılığa sahiptir [6], [7]. İmza güncellemelerinin manuel ve gecikmeli yapısı, gerçek zamanlı koruma için yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlılıklar, davranışsal modelleme ve istatistiksel öğrenme yaklaşımlarına dayalı anomali tabanlı IDS (AIDS) çözümlerini ön plana çıkarmıştır [8].

Makine öğrenmesi (ML) tabanlı IDS sistemleri, ağ trafiğinden çıkarılan özellikler üzerinden bilinen ve bilinmeyen saldırıları öğrenebilen, uyarlanabilir bir tespit katmanı sağlamaktadır [9], [10]. 2015 sonrasında etiketli veri setlerinin yaygınlaşması, GPU hızlandırmalı hesaplamanın erişilebilir hale gelmesi ve derin öğrenme alanındaki atılımlar, ML tabanlı IDS araştırmalarını hızla yoğunlaştırmıştır [11]-[13]. Aynı dönemde IoT/IIoT, SDN ve bulut güvenliği bağlamlarında ortaya çıkan yeni saldırı türleri, daha esnek ve genellenebilir tespit modellerinin gerekliliğini güçlendirmiştir [14], [15].

Bu çalışma, 2015-2025 yılları arasında yayımlanmış hakemli akademik literatürü yapılandırılmış (anlatısal) bir derleme yaklaşımıyla inceleyerek ML tabanlı IDS alanının evrimini üç dönem etrafında yapılandırmaktadır: (i) klasik denetimli öğrenme dönemi (2015-2017), (ii) anomali tespiti ve derin öğrenmeye geçiş dönemi (2018-2020) ve (iii) gerçek dünya uygulanabilirliği, açıklanabilirlik ve güncel yaklaşımlar dönemi (2021-2025). Bu yapılandırılmış bakış açısı, alanın metodolojik dönüşümünü, veri setlerinin gelişimini ve kalıcı zorlukları bütüncül biçimde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Mevcut derlemelerin çoğu ağırlıklı olarak tek bir eksene (yöntem, veri seti veya zorluk) odaklanırken, bu çalışmanın ayırt edici yönü; yöntem, veri seti ve zorluk eksenlerini tek bir kronolojik çerçevede birlikte sentezlemesidir. Çalışmanın katkıları üç başlık altında özetlenebilir: (a) son on yılın metodolojik eğilimlerinin karşılaştırmalı bir sentezinin sunulması, (b) sıkça kullanılan IDS veri setlerinin güçlü ve zayıf yönlerinin karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi ve (c) gelecekteki araştırmalar için açık problemlerin ve öncelikli yönlerin belirlenmesi.

II. YÖNTEM VE KAPSAM

Bu derleme, yazılım mühendisliğinde literatür incelemeleri için önerilen ilkelerden [16] esinlenen, yapılandırılmış ancak anlatısal (narrative) bir yaklaşımla yürütülmüştür. İncelenen çalışmalar; IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink ve arXiv gibi başlıca akademik veri tabanlarından, "intrusion detection", "machine learning", "deep learning", "anomaly detection" ve "IDS dataset" gibi anahtar kelimeler kullanılarak taranmıştır. Kapsam, 2015-2025 yılları arasında yayımlanmış ve ML/derin öğrenme tabanlı IDS yöntemlerine, kıyaslama veri setlerine veya değerlendirme metriklerine doğrudan katkı sunan hakemli yayınlarla sınırlandırılmıştır. Alanın kavramsal temellerini oturtmak amacıyla, bu aralığın dışında kalan sınırlı sayıda temel kaynağa (örneğin erken dönem derlemeler ve klasik veri setleri) yalnızca arka plan amacıyla atıf yapılmıştır.

İncelenen çalışmalar; baskın öğrenme paradigması (denetimli, denetimsiz, derin/hibrit), kullanılan kıyaslama veri seti ve raporlanan değerlendirme metrikleri bakımından sınıflandırılmıştır. Birincil bulgu içermeyen, tekrar niteliğindeki veya erişilemeyen kaynaklar değerlendirme dışında tutulmuştur. Bu çalışmada aktarılan sayısal değerler, ilgili birincil kaynaklarda bildirildikleri haliyle ve kendi deneysel koşulları altında raporlanmış olup; farklı veri setleri, ön işleme adımları ve değerlendirme protokolleri nedeniyle çalışmalar arası doğrudan karşılaştırmaların sınırlılıkları gözetilmelidir. Dolayısıyla bu çalışma, nicel bir meta-analiz değil; metodolojik eğilimleri, veri setlerini ve açık problemleri bütünleştiren niteliksel ve karşılaştırmalı bir sentez sunmaktadır.

III. 2015-2025 Döneminde ML Tabanlı IDS Yaklaşımlarının Evrimi

A. *2015-2017: Klasik Makine Öğrenmesi ve Denetimli Öğrenme Dönemi*

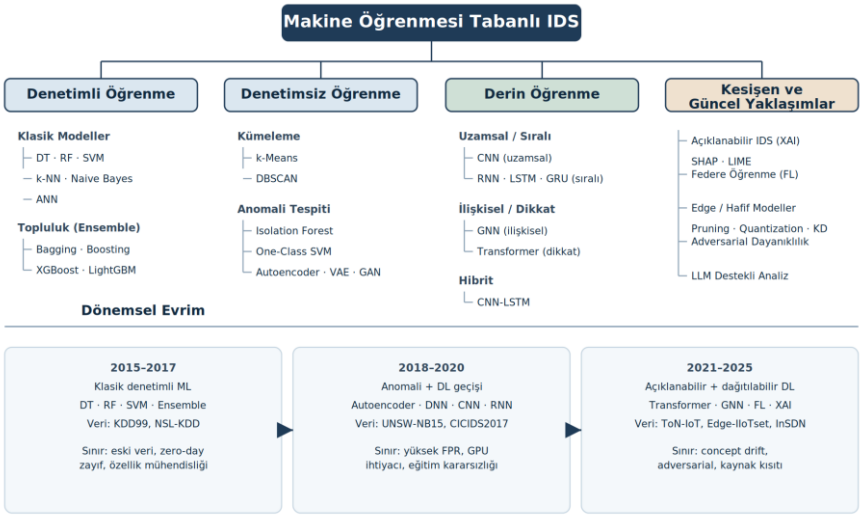
Bu dönemde araştırmalar büyük ölçüde Karar Ağaçları (DT), Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makineleri (SVM), k-En Yakın Komşu (k-NN), Naive Bayes (NB), Lojistik Regresyon ve Yapay Sinir Ağları (ANN) gibi klasik denetimli öğrenme yöntemlerine yoğunlaşmıştır [17]-[19]. Tavallaee ve ark.'nın eleştirel analizi sonrasında NSL-KDD veri seti, KDD Cup 1999'un yerini almış ve bu dönemde en yaygın kullanılan kıyaslama veri seti haline gelmiştir [17]. Kevric ve ark. (2017) gibi çalışmalar, topluluk öğrenme (ensemble) yaklaşımlarının tek model performansına kıyasla %2-4 oranında doğruluk artışı sağladığını raporlamıştır [21]. Bu dönemin temel odağı, etiketli veri ile bilinen saldırı sınıflarında yüksek doğruluk elde etmek ve özellik mühendisliği yoluyla performansı iyileştirmektir.

B. *2018-2020: Anomali Tespiti ve Derin Öğrenmeye Geçiş*

Bu dönemde etiketli veri sınırlılıkları ve zero-day tehditler, denetimsiz öğrenme ve derin öğrenme yaklaşımlarının yükselişine zemin hazırlamıştır. Vinayakumar ve ark., DNN tabanlı ölçeklenebilir bir IDS çerçevesi önererek farklı veri setlerinde tutarlı sonuçlar elde etmiştir [22]. Yin ve ark., RNN tabanlı IDS yaklaşımlarının NSL-KDD üzerinde klasik yöntemlere kıyasla %2-6 oranında daha yüksek tespit oranı sağladığını göstermiştir [23]. Aynı dönemde otokodlayıcı (autoencoder) ve Variational Autoencoder (VAE) tabanlı anomali tespit modelleri, zero-day saldırılarda öne çıkmıştır [24], [25]. Sharafaldin ve ark.'nın CICIDS2017 veri setini yayımlaması, modern saldırı türlerini içeren güçlü bir kıyaslama altyapısı sağlamış ve sonraki çalışmalara metodolojik bir basamak oluşturmuştur [26].

C. *2021-2025: Gerçek Dünya Uygulanabilirliği, Açıklanabilirlik ve Güncel Yaklaşımlar*

Son dönemde araştırmalar derin öğrenmeyi merkeze alırken, gerçek dünya dağıtımına yönelik kısıtlamaları da hesaba katmaya başlamıştır. Açıklanabilir yapay zekâ (XAI) tabanlı IDS yaklaşımları, alarm yorgunluğu ve operatör güvenini ele almak amacıyla SHAP ve LIME gibi yorumlama yöntemlerini IDS çıktılarına entegre etmiştir [27], [28]. Mothukuri ve ark., federe öğrenme (FL) tabanlı IDS yaklaşımlarının veri gizliliğini koruyarak çok kuruluşlu işbirliği sağlayabileceğini ortaya koymuştur [29]. Transformer tabanlı modeller ve Graph Neural Networks (GNN), ağ akışlarındaki ilişkisel yapıyı modelleyerek karmaşık saldırı senaryolarında öne çıkmıştır [30], [31]. IoT/IIoT bağlamında ise Edge AI ve hafifletilmiş derin öğrenme mimarileri, kaynak kısıtlı cihazlarda tespit kabiliyetini sürdürmek için tasarlanmıştır [14], [32]. Bu dönemsel evrim, baskın yaklaşımlar, yöntemler, yaygın veri setleri ve sınırlılıklar bakımından Tablo 1'de özetlenmiş; yaklaşımların taksonomisi ile dönemsel evrimi ise Şekil 1'de bütüncül olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 1. Makine öğrenmesi tabanlı IDS yaklaşımlarının taksonomisi ve 2015-2025 dönemine ilişkin metodolojik evrimi.

IV. Denetimli Öğrenme Tabanlı IDS Yaklaşımları

Denetimli öğrenme yöntemleri, etiketli ağ akışlarından öğrenilen sınıf sınırları üzerinden bilinen saldırı türlerini yüksek doğrulukla tespit etmektedir. Karar ağaçları açık karar kuralları sayesinde yorumlanabilir bir tespit yüzeyi sunmakta, ancak yüksek varyansa sahip olabilmektedir [18]. Rastgele Orman, çok sayıda ağacın oylama mekanizmasıyla bu varyansı azaltmakta; çeşitli çalışmalarda UNSW-NB15 ve CICIDS2017

üzerinde, ilgili deneysel koşullar altında sıklıkla %95'in üzerinde doğruluk değerleri raporlanmıştır [21], [26].

SVM, yüksek boyutlu uzayda doğrusal olmayan sınırlar kurabildiğinden küçük ölçekli veri setlerinde güçlüdür; ancak büyük ölçekli IDS verilerinde eğitim maliyeti bir kısıt oluşturur [19]. XGBoost ve LightGBM gibi modern topluluk (boosting) yöntemleri öne çıkmıştır; örneğin Tama ve ark., iki aşamalı topluluk yaklaşımının bildirilen koşullar altında güncel veri setlerinde yer yer %99'a yaklaşan F1-skorları elde edebildiğini raporlamıştır [33]. k-NN ve Naive Bayes ise hızlı baseline'lar için tercih edilse de, sorgu süresi (k-NN) ve bağımsızlık varsayımı (NB) nedeniyle yardımcı bileşen olarak konumlandırılır [9].

V. Denetimsiz Öğrenme ve Zero-Day Saldırı Tespiti

Denetimsiz öğrenme yaklaşımları, normal trafiğin örüntüsünü modelleyerek bu örüntüden sapmaları anomalik etkinlik olarak işaretler. k-Means ve DBSCAN gibi kümeleme yöntemleri erken dönem AIDS çözümlerinde sıkça kullanılmıştır [8]. Isolation Forest ve One-Class SVM, etiketsiz veride bile etkili sınıf sınırları kurabilmesi nedeniyle popülerlik kazanmıştır [25].

Otokodlayıcılar normal trafiği düşük yeniden yapılandırma hatasıyla temsil eder; Mirsky ve ark.'nın Kitsune çevrimiçi otokodlayıcı topluluğu paket düzeyinde gerçek zamanlı tespite örnektir [24]. VAE ve GAN tabanlı modeller daha karmaşık dağılımları öğrenebilse de eğitim kararsızlığı ve mod çöküşü gibi sorunlar taşır [25]. Denetimsiz yaklaşımlar zero-day için avantajlı olsa da, yüksek yanlış pozitif oranı (FPR) operasyon merkezlerinde alarm yorgunluğuna yol açabilir [10].

VI. Derin Öğrenme ve RNN Tabanlı IDS Yaklaşımları

DNN, CNN, RNN, LSTM, GRU ve Transformer, IDS literatüründe öne çıkan derin mimarilerdir [11], [12]. CNN'ler özellik mühendisliğine bağımlılığı azaltırken; RNN, LSTM ve GRU ağ trafiğinin sıralı yapısını ve uzun dönemli bağımlılıklarını modellemede güçlüdür [23], [34].

LSTM, kapı (gate) mekanizmalarıyla uzun saldırı dizilerini yakalar [34]; GRU daha az parametreyle benzer başarıyı sağladığından kaynak kısıtlı senaryolarda tercih edilir [35]. CNN-LSTM hibritleri, CNN'in özellik çıkarımı ile LSTM'in zamansal modellemesini birleştirerek DDoS, botnet ve port-scan gibi çok adımlı saldırılarda yüksek tespit oranları raporlamıştır [12], [13]. 2022 sonrasında Transformer mimarileri, dikkat (attention) mekanizmasıyla uzun bağımlılıkları paralel modelleyerek alana alternatif sunmuştur [30]. Sıkça kullanılan algoritmaların öğrenme türü, avantaj/dezavantajları ve gerçek zamanlı uygunluğu Tablo 2'de karşılaştırılmıştır.

VII. Veri Setlerinin Gelişimi

Veri setleri, ML tabanlı IDS araştırmalarının metodolojik temelini oluşturur. KDD Cup 1999 ve onun temizlenmiş versiyonu olan NSL-KDD, uzun yıllar boyunca standart kıyaslama veri setleri olarak kullanılmıştır [17]. Ancak bu veri setleri 1990'lı yılların ağ trafiğine dayandığından, modern protokoller, bulut servisleri ve IoT trafiği gibi günümüz tehdit yüzeyini yeterince temsil etmemektedir [36]. UNSW-NB15 modern saldırı türlerini ve gerçekçi arka plan trafiğini içeren bir alternatif olarak öne çıkmış [37]; CICIDS2017 ve CSE-CIC-IDS2018 ise çok günlük yakalama yapıları ile akış tabanlı (flow-based) modern özellikleri standart hale getirmiştir [26].

IoT ve IIoT bağlamında Bot-IoT, ToN-IoT ve Edge-IIoTset gibi veri setleri, kaynak kısıtlı cihazlara yönelik saldırıları yakalama imkânı sağlamıştır [38], [39]. Aynı dönemde InSDN gibi SDN'e özgü veri setleri ve NF-UQ-NIDS gibi standartlaştırılmış akış tabanlı koleksiyonlar, kıyaslamada karşılaştırılabilirliği artırmaya yönelmiştir [40]. Tablo 3, bu çalışmada incelenen veri setlerinin karşılaştırmalı bir özetini sunmaktadır.

VIII. Performans Metrikleri ve Sayısal Bulgular

IDS değerlendirmesinde sıkça raporlanan metrikler doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall), F1-skoru, tespit oranı (DR), yanlış pozitif oranı (FPR), AUC-ROC, eğitim/çıkarım süresi ve bellek kullanımıdır. Sınıf dengesizliğinin yüksek olduğu IDS veri setlerinde tek başına doğruluk metriği yanıltıcı olabilmekte; bu nedenle F1-skoru ve dengeli doğruluk gibi metrikler tercih edilmektedir [10], [11]. Recall, saldırı kaçırmamak açısından kritik bir öneme sahipken; FPR, gerçek operasyon ortamlarında alarm yorgunluğuyla doğrudan ilişkilidir [9], [27].

Çıkarım süresi (inference time) ve hesaplama karmaşıklığı, gerçek zamanlı IDS dağıtımı için belirleyici metriklerdir; özellikle Edge AI ve IoT senaryolarında bellek ve enerji tüketimi de raporlanmalıdır [14], [32].

IX. Metodolojik Eğilimler

İncelenen literatür üç belirgin eğilim göstermektedir: (i) klasik denetimli öğrenmeden derin ve hibrit modellere geçiş; (ii) sentetik örnekleme (SMOTE, ADASYN, GAN) ve maliyet duyarlı öğrenmeyle sınıf

dengesizliğiyle mücadele [41]; (iii) açıklanabilirlik, gizlilik koruma (federe öğrenme) ve hafif modellerin öne çıkması [27], [29]. Ayrıca çoklu veri setiyle çapraz değerlendirme (cross-dataset evaluation), modellerin genellenebilirliğini sorgulayan bir eğilim olarak belirginleşmiştir [42].

X. Gerçek Dünya Uygulanabilirliği

Laboratuvar başarımı gerçek üretim ağlarında her zaman korunamaz; başlıca nedenler concept drift, şifreli trafiğin yaygınlaşması, sınırlı eğitim verisi ve SOC entegrasyon zorluklarıdır [42], [43]. Ayrıca çekişmeli saldırılar (adversarial attacks) küçük perturbasyonlarla tespiti atlatabilir [44]. Üretime geçiş; modellerin sürekli yeniden eğitimini, izlenmesini ve açıklanabilir kararlar üretmesini gerektirir.

XI. Temel Zorluklar

IDS veri setlerinde normal trafik, saldırı trafiğinden çoğunlukla bir-iki büyüklük mertebesi fazladır; nadir saldırı türleri çok düşük oranlarla temsil edilir [41]. SMOTE, ADASYN, maliyet duyarlı öğrenme ve GAN tabanlı sentetik üretim bu dengesizliği hafifletmek için sıklıkla kullanılır. Derin öğrenme modelleri ise yüksek GPU/bellek kaynağı talep ederek gerçek zamanlı çıkarımı kısıtlar [13] ve bu durum Edge/IoT cihazlarında belirginleşir; budama (pruning), nicemleme (quantization) ve bilgi damıtma (knowledge distillation) gibi yöntemler hafif modellerin üretimini kolaylaştırır [32].

Dağıtım aşamasında concept drift, şifreli trafik analizi, model güncelleme ihtiyacı, veri gizliliği, SOC entegrasyonu ve adversarial dayanıklılık birbirine bağlı pratik sorunlar oluşturur [42]-[44]. Federe öğrenme, çevrimiçi ve sürekli öğrenme (continual learning) bu sorunlara kısmi yanıt sunsa da kalıcı çözümler daha fazla araştırma gerektirir.

XII. Yeni Araştırma Eğilimleri

Güncel araştırmalar; açıklanabilir IDS, federe öğrenme, Transformer/GNN tabanlı modeller, zero-shot/few-shot ve self-supervised öğrenme, sürekli/çevrimiçi öğrenme, Edge/IoT-yerel IDS, SDN tabanlı dinamik tepki, adversarial dayanıklı IDS ve LLM destekli güvenlik analizi yönlerine odaklanmaktadır [27]-[32], [44], [45]. Bu eğilimler modelleri yalnızca daha doğru değil; daha güvenilir, gizlilik dostu ve operasyonel olarak sürdürülebilir kılmayı amaçlar.

XIII. Karşılaştırmalı Tablolar

Tablo 1. 2015-2025 döneminde ML Tabanlı IDS yaklaşımlarının evrimi

Dönem	Baskın Yaklaşım	Yöntemler	Yaygın Veri Setleri	Sınırlılıklar
2015-2017	Klasik denetimli ML	DT, RF, SVM, k-NN, NB, ANN, Ensemble	KDD99, NSL-KDD	Eski veri, zero-day zayıf, özellik mühendisliği bağımlı
2018-2020	Anomali tespiti + DL geçişi	Autoencoder, VAE, DNN, CNN, RNN, LSTM	UNSW-NB15, CICIDS2017	Yüksek FPR, GPU ihtiyacı, eğitim kararsızlığı
2021-2025	Açıklanabilir + dağıtılabilir DL	CNN-LSTM, Transformer, GNN, FL, XAI, Edge AI	ToN-IoT, Edge-IIoTset, InSDN	Concept drift, adversarial, kaynak kısıtı

Tablo 2. IDS alanında sıkça kullanılan algoritmaların karşılaştırması

Algoritma	Öğrenme Türü	Avantaj	Dezavantaj	Gerçek Zamanlı IDS Uygunluğu
Decision Tree	Denetimli	Yorumlanabilir, hızlı çıkarım	Yüksek varyans	Yüksek
Random Forest	Denetimli (Ensemble)	Sağlam, dengesizliğe görece dayanıklı	Bellek yoğun	Orta
SVM	Denetimli	Yüksek boyutlu uzayda etkili	Büyük veride yavaş	Düşük-Orta
XGBoost / LightGBM	Denetimli (Boosting)	Yüksek doğruluk	Hiperparametre ayarı zor	Orta-Yüksek
k-Means / DBSCAN	Denetimsiz	Etiket gerekmez	Yoğunluk/küme sayısı duyarlı	Orta

Algoritma	Öğrenme Türü	Avantaj	Dezavantaj	Gerçek Zamanlı IDS Uygunluğu
Isolation Forest	Denetimsiz	Hızlı, yüksek boyutta etkili	Çok dağılımlı veride zayıf	Yüksek
Autoencoder / VAE	Denetimsiz (DL)	Zero-day tespiti	Eğitim maliyeti	Orta
CNN	Denetimli (DL)	Otomatik özellik çıkarımı	GPU ihtiyacı	Orta
RNN / LSTM / GRU	Denetimli (DL, Sıralı)	Zamansal bağımlılık	Yavaş eğitim	Orta
Transformer / GNN	Denetimli (DL)	Uzun bağımlılık + ilişkisel modelleme	Yüksek hesaplama	Düşük-Orta

Tablo 3. IDS Veri Setlerinin Karşılaştırması

Veri Seti	Yıl	Trafik Türü	Saldırı Türleri	Güçlü Yönler	Sınırlılıklar
KDD Cup 1999	1999	Sentetik / TCP dump	DoS, Probe, R2L, U2R	Yaygın baseline	Eski, tekrarlı, dengesiz
NSL-KDD	2009	KDD99 temizlenmiş	DoS, Probe, R2L, U2R	Tekrar elenmiş, baseline	Hâlâ eski
UNSW-NB15	2015	Modern karma trafik	9 modern saldırı sınıfı	Modern saldırılar	Etiket gürültüsü
CICIDS2017	2017	Akış (CICFlowMeter)	DDoS, Brute-force, Web, Bot	Modern, çok günlük	Sınıf dengesizliği
CSE-CIC-IDS2018	2018	AWS tabanlı akış	DDoS, Botnet, Infiltration	Bulut ortamı	Büyük boyut
Bot-IoT	2018	IoT testbed	DDoS, Keylog, Data exfil.	IoT odaklı	Yapay testbed
ToN-IoT	2020	IoT/IIoT + telemetri	Geniş spektrum	Çoklu kaynak	Karmaşık ön işleme
Edge-IIoTset	2022	Edge/IIoT	14 saldırı sınıfı	Edge senaryoları	Yeni ve sınırlı yaygınlık
InSDN	2020	SDN trafiği	DDoS, Probe, Botnet	SDN'e özgü	Sınırlı çeşitlilik

XIV. SONUÇ VE ÇIKARIM

Bu çalışma, 2015-2025 döneminde ML tabanlı saldırı tespit sistemlerinin evrimini yapılandırılmış bir derleme yaklaşımıyla inceleyerek üç temel dönem etrafında ele almıştır. Erken dönemde denetimli öğrenme yöntemleri bilinen saldırılar için yüksek doğruluk sağlarken; sonraki dönemde denetimsiz öğrenme ve anomali tespiti zero-day tehditler için kritik bir araç haline gelmiştir. Son dönemde RNN, LSTM, GRU ve Transformer gibi derin mimariler ağ trafiğindeki karmaşık örüntüleri yakalamada güçlü sonuçlar üretmiştir.

Buna karşın veri dengesizliği, hesaplama maliyeti ve dağıtım kısıtlamaları kalıcı zorluklar olmayı sürdürmektedir. Gelecek araştırmalar; açıklanabilir, hafif, çekişmeli olarak dayanıklı, gizliliği koruyan, gerçek zamanlı çalışabilen ve farklı veri setlerinde genellenebilen IDS modelleri yönünde derinleşmelidir. Çalışmamız, mevcut derlemelerden farklı olarak yöntem, veri seti ve zorluk eksenlerini tek bir kronolojik çerçevede birleştirerek; bu öncelikli yönelimleri yapılandırılmış ve karşılaştırmalı bir sentez biçiminde ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Derleme, anlatısal bir yaklaşımla yürütüldüğünden, tam bir sistematik incelemenin (örneğin PRISMA tabanlı) yeniden üretilebilir tarama ve eleme protokolünü kapsamamaktadır. Ayrıca aktarılan sayısal sonuçlar, farklı veri setleri, ön işleme adımları ve değerlendirme protokolleri altında elde edildiğinden çalışmalar arası doğrudan karşılaştırmaya değil, eğilimleri göstermeye yöneliktir. Gelecekteki çalışmalarda, belirli bir veri seti ailesi üzerinde ortak protokollerle yürütülecek nicel bir meta-analiz, buradaki niteliksel sentezi tamamlayıcı nitelikte olacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmanın değerlendirme ve geliştirme aşamalarında geri bildirim sağlayan meslektaşlarına ve INERS'26 değerlendirme kuruluna teşekkür eder.

KAYNAKÇA

[1] Symantec, "Internet Security Threat Report," Symantec Corporation, Tech. Rep., 2019.
[2] ENISA, "Threat Landscape Report," European Union Agency for Cybersecurity, 2022.
[3] M. A. Al-Garadi, A. Mohamed, A. K. Al-Ali, X. Du, I. Ali, and M. Guizani, "A survey of machine and deep learning methods for Internet of Things (IoT) security," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1646-1685, 2020.
[4] S. Scott-Hayward, S. Natarajan, and S. Sezer, "A survey of security in software defined networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 623-654, 2016.
[5] ENISA, "Threat Landscape 2024," *European Union Agency for Cybersecurity*, 2024.
[6] H.-J. Liao, C.-H. R. Lin, Y.-C. Lin, and K.-Y. Tung, "Intrusion detection system: A comprehensive review," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 16-24, 2013.
[7] A. Khraisat, I. Gondal, P. Vamplew, and J. Kamruzzaman, "Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges," *Cybersecurity*, vol. 2, no. 1, pp. 1-22, 2019.
[8] P. García-Teodoro, J. Díaz-Verdejo, G. Maciá-Fernández, and E. Vázquez, "Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges," *Computers & Security*, vol. 28, no. 1-2, pp. 18-28, 2009.
[9] A. L. Buczak and E. Guven, "A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1153-1176, 2016.
[10] P. Mishra, V. Varadharajan, U. Tupakula, and E. S. Pilli, "A detailed investigation and analysis of using machine learning techniques for intrusion detection," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 686-728, 2019.
[11] M. A. Ferrag, L. Maglaras, S. Moschoyiannis, and H. Janicke, "Deep learning for cyber security intrusion detection: Approaches, datasets, and comparative study," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 50, p. 102419, 2020.
[12] R. Vinayakumar, M. Alazab, K. P. Soman, P. Poornachandran, A. Al-Nemrat, and S. Venkatraman, "Deep learning approach for intelligent intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 41525-41550, 2019.
[13] Y. Xin et al., "Machine learning and deep learning methods for cybersecurity," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35365-35381, 2018.
[14] N. Moustafa, B. Turnbull, and K.-K. R. Choo, "An ensemble intrusion detection technique based on proposed statistical flow features for protecting network traffic of internet of things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4815-4830, 2019.
[15] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, 2015.
[16] B. Kitchenham and S. Charters, "Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering," Keele University, Tech. Rep. EBSE-2007-01, 2007.
[17] M. Tavallaee, E. Bagheri, W. Lu, and A. A. Ghorbani, "A detailed analysis of the KDD CUP 99 data set," in *Proc. IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications*, 2009, pp. 1-6.
[18] A. Tesfahun and D. L. Bhaskari, "Intrusion detection using random forests classifier with SMOTE and feature reduction," in *Proc. International Conference on Cloud and Ubiquitous Computing and Emerging Technologies*, 2013, pp. 127-132.
[19] W.-C. Lin, S.-W. Ke, and C.-F. Tsai, "CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors," *Knowledge-Based Systems*, vol. 78, pp. 13-21, 2015.
[20] G. Kim, S. Lee, and S. Kim, "A novel hybrid intrusion detection method integrating anomaly detection with misuse detection," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 4, pp. 1690-1700, 2014.
[21] J.Kevric, S. Jukic, and A. Subasi, "An effective combining classifier approach using tree algorithms for network intrusion detection," *Neural Computing and Applications*, vol. 28, no. 1, pp. 1051-1058, 2017.
[22] R. Vinayakumar, K. P. Soman, and P. Poornachandran, "Applying convolutional neural network for network intrusion detection," in *Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, 2017, pp. 122-1228.
[23] C. Yin, Y. Zhu, J. Fei, and X. He, "A deep learning approach for intrusion detection using recurrent neural networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21954-21961, 2017.
[24] Y. Mirsky, T. Doitshman, Y. Elovici, and A. Shabtai, "Kitsune: An ensemble of autoencoders for online network intrusion detection," in *Proc. Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*, 2018.
[25] M. Said Elsayed, N.-A. Le-Khac, S. Dev, and A. D. Jurcut, "Network anomaly detection using LSTM based autoencoder," in *Proc. ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, 2020, pp. 37-45.
[26] I. Sharafaldin, A. H. Lashkari, and A. A. Ghorbani, "Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization," in *Proc. International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*, 2018, pp. 108-116.
[27] S. Wang, J. F. Balarezo, S. Kandeepan, A. Al-Hourani, K. G. Chavez, and B. Rubinstein, "Machine learning in network anomaly detection: A survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 152379-152396, 2021.
[28] S. Neupane et al., "Explainable intrusion detection systems (X-IDS): A survey of current methods, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112392-112415, 2022.
[29] V. Mothukuri, P. Khare, R. M. Parizi, S. Pouriyeh, A. Dehghantanha, and G. Srivastava, "Federated learning-based anomaly detection for IoT security attacks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2545-2554, 2022.
[30] Z. Wu, H. Zhang, P. Wang, and Z. Sun, "RTIDS: A robust transformer-based approach for intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64375-64387, 2022.
[31] W. W. Lo, S. Layeghy, M. Sarhan, M. Gallagher, and M. Portmann, "E-GraphSAGE: A graph neural network based intrusion detection system for IoT," in *Proc. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, 2022, pp. 1-9.
[32] Y. Otoum, D. Liu, and A. Nayak, "DL-IDS: A deep learning-based intrusion detection framework for securing IoT," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 33, no. 3, p. e3803, 2022.
[33] B. A. Tama, M. Comuzzi, and K.-H. Rhee, "TSE-IDS: A two-stage classifier ensemble for intelligent anomaly-based intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94497-94507, 2019.
[34] M. Roopak, G. Yun Tian, and J. Chambers, "Deep learning models for cyber security in IoT networks," in *Proc. IEEE Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2019, pp. 0452-0457.
[35] A. Halbouni, T. S. Gunawan, M. H. Habaebi, M. Halbouni, M. Kartiwi, and R. Ahmad, "CNN-LSTM: Hybrid deep neural network for network intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99837-99849, 2022.
[36] G. Engelen, V. Rimmer, and W. Joosen, "Troubleshooting an intrusion detection dataset: The CICIDS2017 case study," in *Proc. IEEE Security and Privacy Workshops*, 2021, pp. 7-12.
[37] N. Moustafa and J. Slay, "UNSW-NB15: A comprehensive data set for network intrusion detection systems," in *Proc. Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 2015, pp. 1-6.

[38] N. Koroniotis, N. Moustafa, E. Sitnikova, and B. Turnbull, "Towards the development of realistic botnet dataset in the Internet of Things for network forensic analytics: Bot-IoT dataset," *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, pp. 779-796, 2019.
[39] M. A. Ferrag, O. Friha, D. Hamouda, L. Maglaras, and H. Janicke, "Edge-IIoTset: A new comprehensive realistic cyber security dataset of IoT and IIoT applications for centralized and federated learning," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40281-40306, 2022.
[40] M. Sarhan, S. Layeghy, N. Moustafa, and M. Portmann, "NetFlow datasets for machine learning-based network intrusion detection systems," in *Big Data Technologies and Applications*. Springer, 2021, pp. 117-135.
[41] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321-357, 2002.
[42] S. Layeghy and M. Portmann, "Explainable cross-domain evaluation of ML-based network intrusion detection systems," *Computers & Security*, vol. 134, p. 103459, 2023.
[43] I. Ortet Lopes, D. Zou, F. Abdulqadder, F. A. Ruambo, B. Yuan, and H. Jin, "Effective network intrusion detection via representation learning: A Denoising AutoEncoder approach," *Computer Communications*, vol. 194, pp. 55-65, 2022.
[44] A. McCarthy, E. Ghadafi, P. Andriotis, and P. Legg, "Functionality-preserving adversarial machine learning for robust classification in cybersecurity and intrusion detection domains: A survey," *Journal of Cybersecurity and Privacy*, vol. 2, no. 1, pp. 154-190, 2022.
[45] M. A. Ferrag, M. Ndhlovu, N. Tihanyi, L. C. Cordeiro, M. Debbah, and T. Lestable, "Revolutionizing cyber threat detection with large language models," arXiv preprint arXiv:2306.14263, 2023.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Uzun Süreli Uçuş İçin Leylekten İlham Alan Biyomimetik Kanat Profili Tasarımı

Hasan Serdar Balaban[a], Hürrem Akbıyık[b]*

[a] Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstütüsü, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye.
[b*]Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: hakbiyik@atu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Orman Leyleği olarak bilinen Mycteria Americana'nın üst kanat morfolojisinden esinlenilerek biyomimetik bir kanat tasarımı geliştirilmiş ve aerodinamik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu araştırmada leylek kanadının üstten görünüm geometrisini NACA0012 profiliyle birleştirilmiş ve temel model olan NACA0012 kanadıyla karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılacak olan test modelleri, CAD modelleme yöntemi ile oluşturulmuş ve hızlı prototipleme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneyler, 6×10^4 ve $1{,}15\times10^5$ Reynolds sayılarında açık emme tipi bir rüzgâr tünelinde gerçekleştirilmiştir. Test modelinin hücum açısı bilgisayar kontrollü döndürme aparatı kullanılarak 0° ile 24° arasında 1^0'lik artışlarla değiştirilmiştir. Ayrıca, test modellerindeki akış yapılarını belirlemek için TiO_2 yüzey yağ akışı görselleştirme tekniği uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, biyomimetik kanat modelinin temel modele göre daha düşük kaldırma katsayısı sergilediğini, ancak sürüklenme katsayısında önemli bir azalma nedeniyle daha yüksek aerodinamik verimlilik sunduğunu göstermektedir. Leyleklerden esinlenilerek tasarlanan ve özellikle orta ve düşük Reynolds sayılarında yüksek aerodinamik performans sağlaması beklenen kanat tasarımı, İHA'ların verimli uçuşunda umut vadeden bir uygulama potansiyeli göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sürüklenme katsayısı, Kaldırma katsayısı, Leylek ilhamlı model, Yüzey yağı akış görselleştirmesi.*

Stork-Inspired Biomimetic Airfoil Design for Long-Endurance Flight

Hasan Serdar Balaban[a], Hürrem Akbıyık[b]*

[a] Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Graduate School, Department of Aerospace Engineering, Adana/Türkiye.
[b*]Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aerospace Engineering, Adana/Türkiye.
* **Corresponding Author:** hakbiyik@atu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, a biomimetic wing design inspired by the upper wing morphology of Mycteria Americana which is known as Wood Stork's was developed and its aerodynamic properties were experimentally investigated. The research involved combining the top view geometry of a stork wing with the NACA0012 profile and comparing it to a standard NACA0012 wing as a base model. The test models used in the experiments were generated using CAD modeling and produced using rapid prototyping technique. Experiments were conducted in an open-circuit wind tunnel at Reynolds numbers of 6×10^4 and 1.15×10^5. Attack angle of the test models were varied between 0° and 24° with an increment of 1^0 using computer controlled rotary unit. Furthermore, TiO_2 surface oil flow visualization technique was applied to determine flow structures on the test models. The experimental results showed that the biomimetic wing model exhibited lower lift coefficient than the base model, but offered higher aerodynamic efficiency due to a significant reduction in drag coefficient. The wing design, inspired by storks and expected to deliver high aerodynamic performance, especially at medium and low Reynolds numbers, shows promising potential application on efficient flight of UAV.

Keywords: *Drag coefficient, Lift coefficient, Stork inspired model, Surface oil flow visualization.*

I. Introduction

Living organisms on Earth have optimized their morphological features throughout evolution to ensure their survival, passing them down through generations. These morphological advantages, developed by nature through millions of years of trial and error, serve as a reference for solving complex engineering problems, particularly through the transfer of high-performance mechanisms from biological systems to human applications and safe technological use, especially in the aviation industry [1]. In aviation, biomimetic methods generally focus on boundary layer control [2], reduced induced drag [3], and improved stall characteristics by delaying flow separation [4]. In aviation, these biomimetic applications are inspired by plants, insects, aquatic animals, and birds [5]. For example, the tubercles found in the fins of humpback whales can be used as leading-edge serrations, which generating controlled vortices and delaying stalls at high angles of attack. [6]. The water-repellent properties of plants, particularly lotus and rice leaf, represent a potential biomimetic method for anti-icing systems in aircraft [7]. Wing models inspired by dragonflies could potential application for MAV designs [8].

Birds, representing one of the most advanced biomimetic technologies in aviation, possess control mechanisms that allow them to react quickly to sudden changes in flow conditions. Structures called alula found in bird wings increase lift force at low speeds and high attack angles [9]. The covert feathers located on the upper surface of the wing function as naturally evolved passive flow control devices that delay stalling [10]. While owls have wings with a special feather structure that helps them fly wide and quietly relative to their weight, pigeons have shorter wingspans compared to owls, which allows them to reach higher speeds more easily and causes to relatively noisier flight, as observed by Bachmann [11]. When aviation literature is examined, studies on bird wings generally focus on the aerodynamic properties of wing geometry. In terms of storks use thermal air currents to rise vertically and thanks to their highly curved wing forms, generate maximum lift even at low speeds, thus offering a biological reference for aerodynamic research [12]. Studies on the morphology of stork wings in the literature are presented in detail.

A study using computational fluid dynamics examines the wing profiles of eagles, storks, hawks, and albatrosses at low Reynolds numbers. The study compares bio-inspired wings with the man made Eppler 193 wing type. The Eppler 193 is a wing design for flight at low Reynolds numbers. In this context, the results show that the stork wing is more efficient than the other wings in the comparison at the angles of attack below 8 degrees. These results demonstrate that the stork wing structure exhibits successful gliding performance compared to conventional wings and many other bird wing structures in nature [13]. Another numerical study by Tangermann et al. on stork wing design and aerodynamic performance focused on the effect of the fan like feathers at the wingtips of storks on soaring flight. The findings showed that the wingtip structure generates additional lift and transforms a single large vortex into several smaller vortices [14]. Robles et al. (2022) conducted a numerical study using CFD, which depends on the albatrosses and storks' mastery of gliding in low energy air flows. The authors aimed to develop more efficient wind turbines at low wind speeds by incorporating bio-inspired albatross and stork blades into a horizontal axis wind turbine. The results showed that the albatross and stork blades exhibited similar efficiency performance. The authors concluded that the efficiency performance obtained from micro scale models was sufficient when compared to modern large wind turbines, and this design is applicable to modern wind turbines [15]. Eder et al. (2015) investigated the gliding performance of white storks. In their study, lift and drag coefficients were obtained using infrared laser tracking systems. The findings revealed that white storks exhibit excellent adaptation for efficient gliding with high lift ratios, similar to those of high-performance gliders. It is stated that gliding efficiency reaches its maximum performance at medium speeds rather than high speeds [16]. Although storks are aerodynamically good example, they have developed different methods to maximize flight efficiency in various flight scenarios. Another study investigated how storks maintain their flight efficiency by considering their ascent performance in thermal air currents and their wing flapping during flight. Their results showed that storks employ different flight strategies depending on their age when ascending and gliding down in thermal air channels, with older storks particularly focusing on gliding and efficiency during flight [17]. Gergely et al. studied the flight styles and feather structures of different birds. The study addressed the relationship between the tip (primary) and inner (secondary) feather structures in relation to the flight method of storks. Storks were identified as birds with a gliding flight style which was indicated to be the most energetically efficient method due to its low wing flapping frequency. It was noted that the primary feathers at the very tip of the stork separate and spread during flight, forming a multi-wingtip type and exhibiting greater resistance to lateral forces [18]. Storks are known to extensively utilize gliding mechanics during long distance migration. Morphologically possessing a high wing load, storks require a high horizontal speed of 16.07 m/s to achieve their optimal glide ratio of 11.26. In a study by Göksel et al., storks were classified as the only species among the 12 examined that does not using an adaptive strategy adjusting flight speed according to thermal updraft power. In this context, the primary reason for storks' preference for a constant glide speed independent of thermal updraft power is explained as their flocking

and the selection of flight speed being based on the collective flight process rather than individual preferences. Consequently, storks stand out due to their high aerodynamic capacity and flight strategies different from other birds of prey [19]. Another study indicated that the wing structures used by storks while gliding, and especially their foremost primary flight feathers, have evolved to exhibit high aerodynamic performance. Wind tunnel and free atmosphere tests conducted on these primary feathers revealed a remarkably high lift coefficient of 1.5. The olive shaped porous structures extending along the axis of these feathers allow air to pass from the lower to the upper surface, affecting the boundary layer and significantly reducing aerodynamic drag. Furthermore, it was found that the feathers prevent flow separation by increasing nose drop and profile camber under high loads [20].

As a result, storks minimize physical effort by increasing their gliding distances. Based on the studies conducted, it can be said that many factors influence storks' ability to glide with minimal physical effort. Furthermore, it can be concluded that their wing structures evolved for gliding and are aerodynamically efficient. In this context, applying the stork wing structure to traditional symmetrical wings could lead to improvements in flight efficiency, particularly. The targeted results of this study are an increase in lift compared to the basic wing structure and the reduction of friction to the lowest possible level.

The main purposes of this study are as follows:

- Modifying the top view geometry of a stork wing to the NACA0012 airfoil and 3D modeling this biomimetic design to produce it suitable for experiments.
- The aerodynamic force measurements of the produced model will be carried out in a wind tunnel at different angles of attack and Reynolds numbers, and in this context, the lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D) and aerodynamic efficiency (L/D) data will be obtained to determine the aerodynamic performance characteristics.
- This study involves processing the data obtained from measuring the forces and comparing it with the performance data of a standard wing.
- Evaluating the effect of a bioinspired stork wing on drag reduction or flow control by comparing it to a NACA0012 airfoil.
- The aim of this study is to investigate flow separations, turbulent flow structures, and reattachment line/region structures on the wing using TiO_2-based surface oil flow visualization techniques.

The following sections of this study are as follows: Section II describes the design and manufacturing processes of the bio-inspired stroke wing and NACA0012 airfoil to be used in the experiments. This section also presents the characteristics of the wind tunnel to be used in the experiments, information about the force measurement system, and information about the mixture to be used in TiO_2 oil flow visualization. Section III contains the results of the aerodynamic force measurement and TiO_2-based surface oil flow visualization performed in the wind tunnel. Section IV is the section where the obtained results are discussed.

II. Material and Method

The wing model is inspired by the upper wing profile of the Wood Stork, these species commonly found in the tropical regions of South America. It has a very wide wingspan and elliptical wingtips, optimized for use in aerodynamic experiments. Its curved profile ensures maximum lift even at low speeds. In this study, the Wood Stork's upper wing geometry was generated using splines in a 3D design program and modified with an NACA0012 cross section. The stork inspired wing, modeled as shown in Figure 1, was manufactured using a Creality Ender 3S-1 printer. Because the finished wing model is intended for experimental use, a smooth surface is essential. Therefore, surface roughness resulting from 3D printing was removed by puttying and sanding. Sanding was performed from 120 grit to 3000 grit. The sanded model was painted with matte black paint because it will be used in flow visualization experiments. Additionally, a base model with a 100 mm chord and a 240 mm span was produced for comparison of results obtained in the experiments. All these manufacturing processes are presented step by step in the diagram in Figure 1.

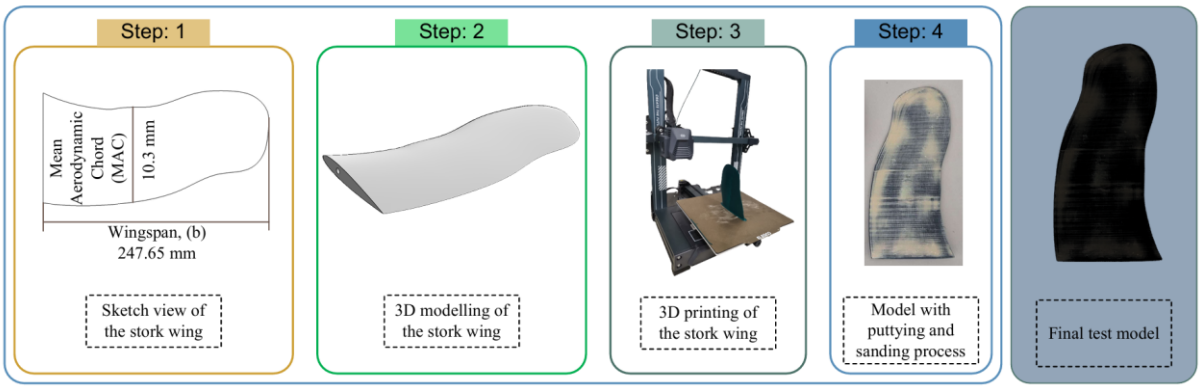


Figure 1. Stork-inspired wing model producing process schema.

A schematic and general view of the force measurement system is presented in Figure 2. The wind tunnel used in the experiments is a low speed open circuit wind tunnel. The test section of the wind tunnel where the tests were conducted is 400 × 400 (mm) and its length is 1200 mm. The turbulence intensity is less than 1%. The systems used in aerodynamic force measurements are as follows: A 6-axis ATI Gamma load cell was used to measure the lift and drag forces generated by the model. A total of 400 data was collected with a sampling frequency of 4000 Hz, and after each measurement, the system was reconfigured and data was collected once more. The reason for taking the measurements twice is to minimize the margin of error that may occur due to the system. The angle of attack of the wing model was selected in 1° increments within the range of $0° \leq \alpha \leq 24°$, and each angle of attack was adjusted using a computer controlled rotary unit. An end plate was placed on the underside of the wing to avoid being affected by tip effects that may occur at the root of the wing. The gap between the end plate and the wing was set to approximately 1.23 mm using the equation $g = s \times 0.005$ found in the literature [21]. To comprehensively investigate the effects of different flow velocities and regimes on wing performance, experiments were conducted at two different Reynolds numbers. The Reynolds numbers, which depend on the mean aerodynamic chord length, were determined as 6×10^4 and 1.15×10^5. The free stream velocity, depending on the Reynolds number, was measured using a pitot tube, and the frequency value corresponding to the velocity value was adjusted using a frequency inverter.

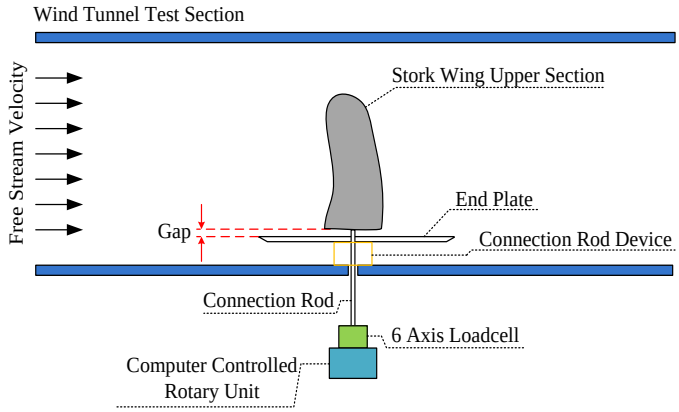


Figure 2. Schematic representation and overview of the force measurement system.

The TiO_2-based surface oil flow visualization technique was used to reveal the flow topology on the surface of the wing model. The liquid mixture applied to the wing surface is affected by the flow, generating structures on the model surface, and the interpretation of these structures provide information about the state of the flow. In the literature, different oils such as gas oil, motor oil, and kerosene are used with different mixing ratios when producing TiO_2 mixtures. Examples of these mixtures are given in Table 1.

Table 1. TiO_2 mixture ratios and contents found in the literature

References	Mixture Contexts	Mixture Ratio
[22]	TiO_2 powder Oleic acide SAE30 motor oil	1:5:7
[23]	Silicon oil TiO_2 powder Oleic acide	8:1:1
[24]	Kerosene TiO_2 powder Oleic acide	6:3:2

In this study, examples from the literature were examined, and TiO_2 powder, oleic acid, and SAE30 engine oil were used, with a mixing ratio of 1:5:7. The surface oil technique was performed at the critical angles of attack determined in the force measurements. Unlike in the force measurement experiment, the wing model was mounted horizontally in the wind tunnel, as shown in Figure 3, to allow the flow to be parallel to the surface.

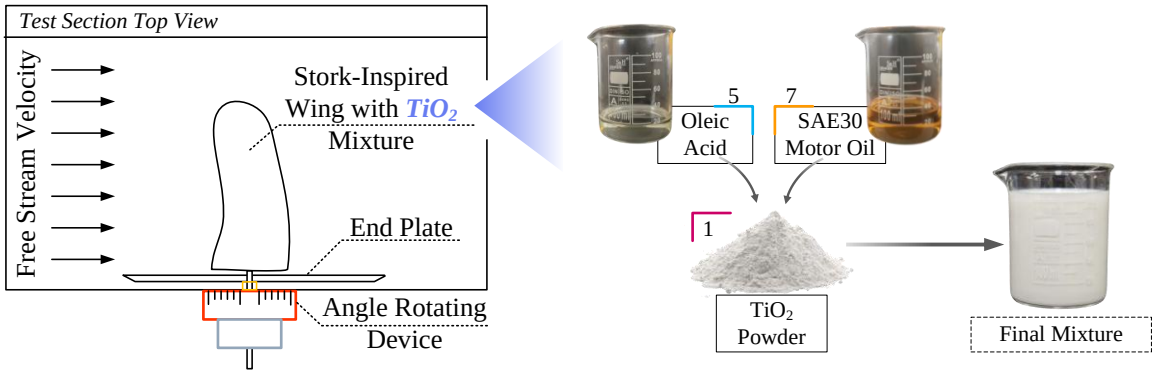


Figure 3. a) Schematic view of the TiO_2 surface flow visualization experimental system and b) chart showing the mixture content and ratios.

As a result of the studies, the aerodynamic performance and flow regimes of NACA0012 airfoil, modified based on the design of a stork's wing and standard NACA0012 wings were evaluated and interpreted using the specified methods. The aerodynamic performance results of the two models were compared with the findings obtained.

III. Results and Discussion

This section details the aerodynamic performance characteristics of a biomimetic model developed based on the Wood Stork (Mycteria Americana) wing morphology under free flow conditions. Experimental data were obtained through aerodynamic force measurements performed in an open suction wind tunnel setup and TiO_2-based surface oil flow visualization techniques applied to determine critical flow regimes. Force measurement experiments were conducted at Reynolds numbers of 6×10^4 and 1.5×10^5. The angle of attack was scanned with 1° increments, starting from 0° and reaching up to 24°, including the post stall region.

Figures 4 and 5 show the results of these repeated measurements and the calculated average curves for both Reynolds numbers. The closeness of the data between the measurement sets demonstrates the stability of the experimental setup and that the margin of error remains within acceptable limits.

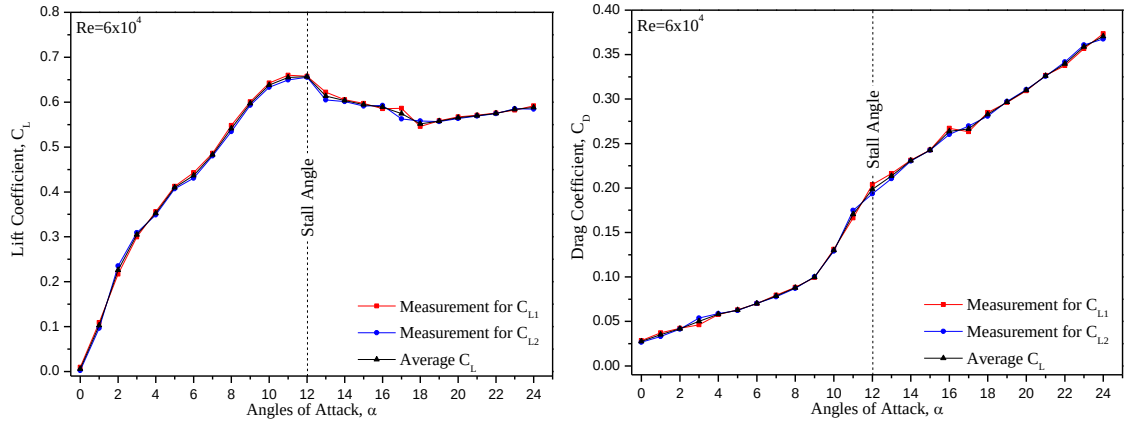


Figure. 4 Repeated measurement values and their averages for the aerodynamic coefficients of the base model at 6×10^4 Reynolds number

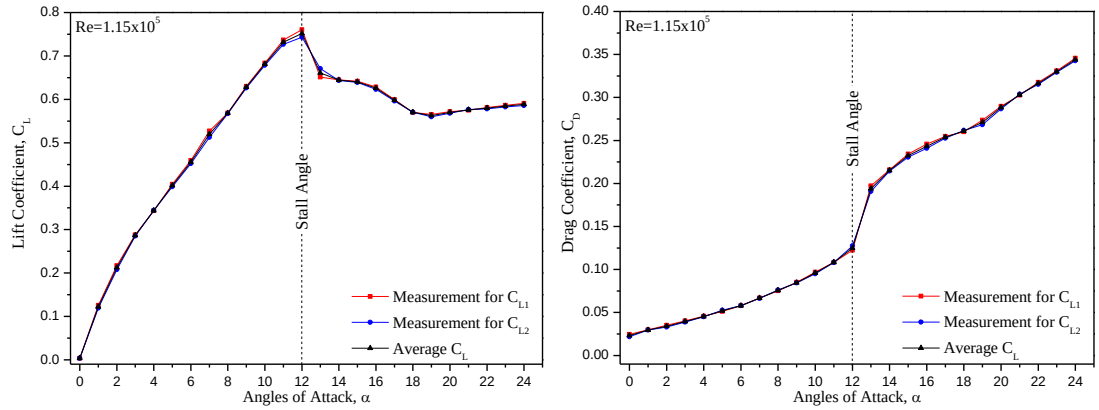


Figure 5. Repeated measurement values and their averages for the aerodynamic coefficients of the base model at 1.2×10^5 Reynolds number

Figure 6 presents the lift, drag and lift to drag ratio graphs of the stork inspired and base models at a Reynolds number of 6×10^4, based on the results of force measurement experiments. Examining the lift coefficient graph, it is seen that the base model produces more C_L than the stork wing both before and after a stall. The base model's C_{Lmax} is 0.656 at 12 degrees, while the stork model's C_{Lmax} is 0.576 at 11 degrees. The base model's C_L value increases again from 18° after a stall, while the stork wing's C_L starts to rise again from 17°. Furthermore, the decrease in C_L after a stall is sharper in the base model compared to the stork wing. Although the stork wing's C_L value is lower than the base model's, the significantly lower C_D values indicate that the stork wing is more efficient in terms of aerodynamic efficiency. It has also been frequently emphasized in the literature that storks naturally reduce drag [16]. Examining the drag force graph, it is seen that the base model's drag force is higher throughout the graph. The difference in C_D between the base model and the stork model becomes apparent after the stall. At the stall angles of each airfoil, the base model's C_D value is 0.198, while the stork model's C_D value is 0.142. In this case, at angles of attack of 11° and 12°, the stork model reduced drag by approximately 39.4% compared to the base model. When examining the lift to drag ratio graph, although the base model's efficiency is higher at low angles of attack such as 1° and 2°, the stork model maximizes aerodynamic efficiency at angles of attack between 3° and 8°. The stork model's maximum L/D value is 7.057, and it has improved aerodynamic efficiency by 7.28% compared to the base model.

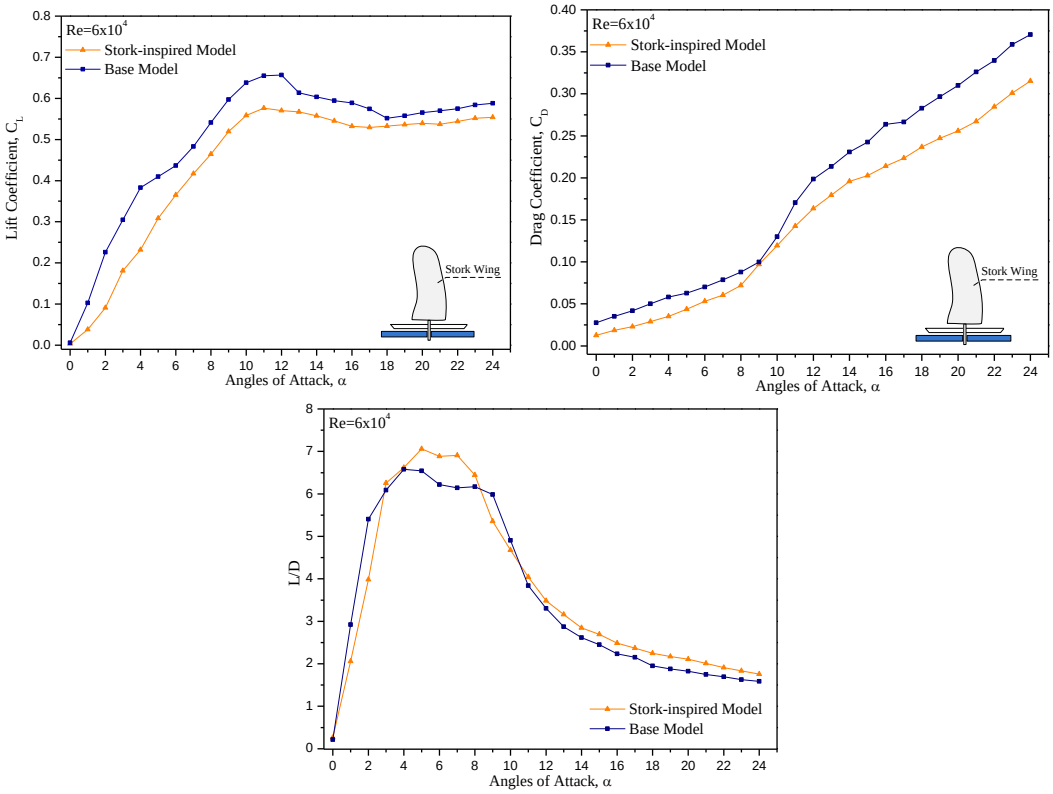


Figure 6. Lift, drag coefficients and L/D of Stork-inspired wing model with NACA0012 iarfoil at 6×10^4 Reynolds number

Figure 7 presents the lift, drag and lift to drag ratio graphs of the stork inspired and base models obtained from force measurement experiments at a Reynolds number of 1.15×10^5. The data obtained from the graphs reveal the effectiveness of the biomimetic model in minimizing the total drag force. When the lift coefficients are examined, the C_{Lmax} value of the base model is 0.752 at a 12° angle of attack. After 12°, the base model experiences a sharp lift loss up to a 19° angle of attack due to the flow breaking off from the upper surface of the wing, and then becomes stable after 19°. The C_{Lmax} value of the stork model is 0.628 at a 12° angle of attack. The stork inspired wing model exhibited a more stable and gradual behavior after stall compared to the base model. The most remarkable finding of the study was observed in the drag C_D values. The drag coefficient of the stork inspired wing model is generally significantly lower compared to the base model. This demonstrates the success of the stork's characteristic top view morphology in optimizing pressure distribution on the surface, thereby reducing interference and induced drag. The literature emphasizes that storks manage flow thanks to their large wing surface area and curved structures [25]. This significant reduction in drag force played a dominant role in the overall aerodynamic efficiency.

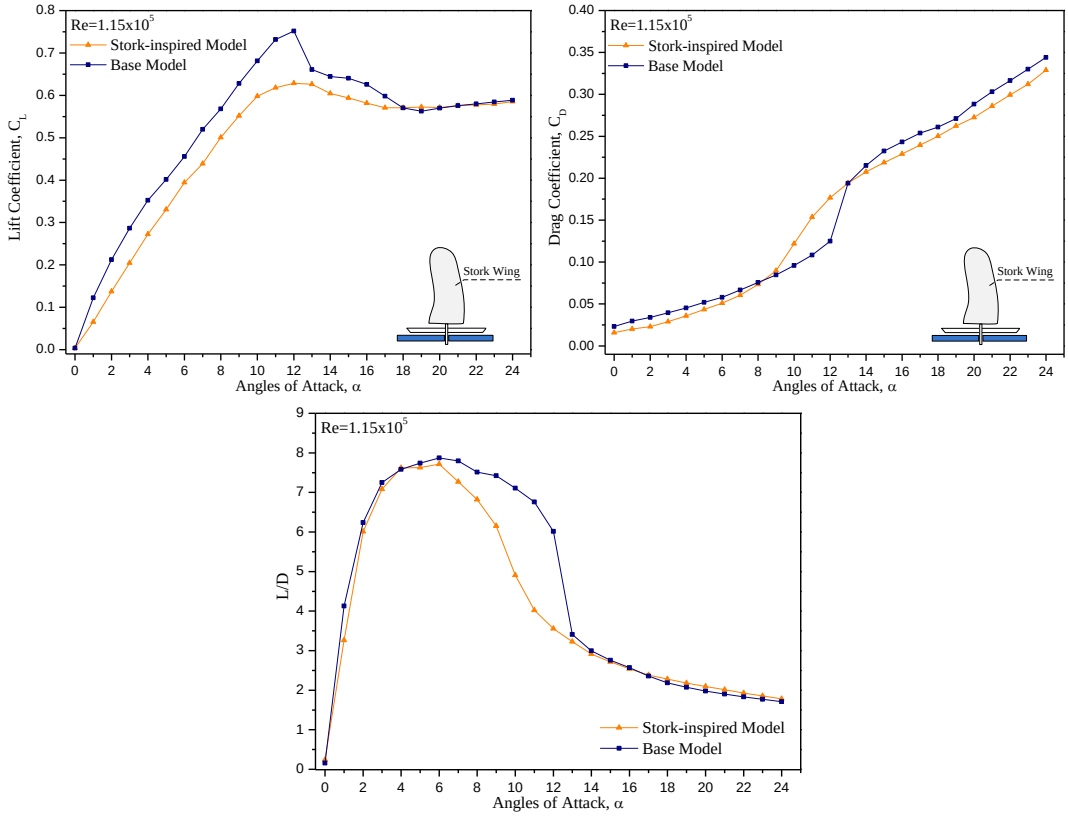


Figure 7. Lift, drag coefficients and L/D of Stork-inspired wing model with NACA0012 airfoil at 1.15×10^5 Reynolds number

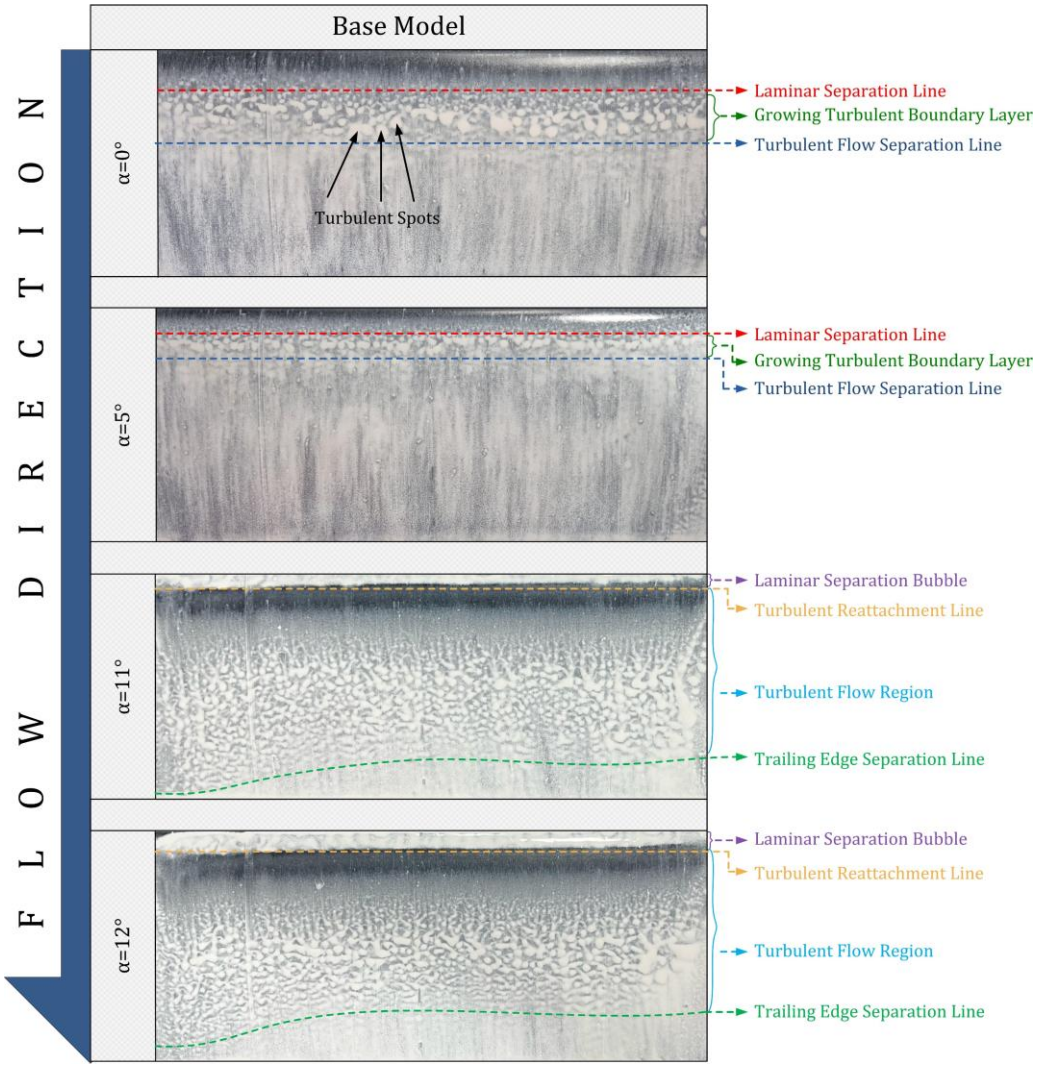


Figure 8. Surface oil flow visualization results of base model

Surface oil flow visualization technique was used to observe the flow topologies on the wing models. Figure 8 shows the surface flow topologies for the base model airfoil profile at AoA of 0°, 5°, 11° and 12°. These critical angles of attack were selected based on the findings obtained from force measurement results. At AoA of 0°, the flow separated laminarly and subsequently, turbulent spots formed due to the accumulation of TiO_2. These turbulent spots can be attributed to the formation of a growing turbulent boundary layer. When the flow topology is examined, it is seen that the separated shear layer regains energy from the free stream flow and reattaches turbulently to the surface. As AoA increases, the laminar separation line and the turbulent reattachment line begin to move towards the leading edge of the wing. At 11°, immediately preceding the stall angle, the formation of a laminar separation bubble was observed. Laminar separation bubble formation at low Reynolds numbers is frequently observed in the literature [26-28]. The laminar separation line defines the point where the boundary layer separates from the wing surface, while the turbulent reattachment line represents the point where the flow gains momentum and reattaches to the surface. Between these two boundaries lies a laminar separation bubble, typically formed by the separation of the laminar boundary layer due to the effect of an adverse pressure gradient (APG) [29]. Upon reaching AoA 12°, it was observed that the trailing edge separation line approached the leading edge and the laminar separation bubble area widened, resulting in a narrowing of the area that generates effective lift. These findings indicate that the wing is approaching stall conditions.

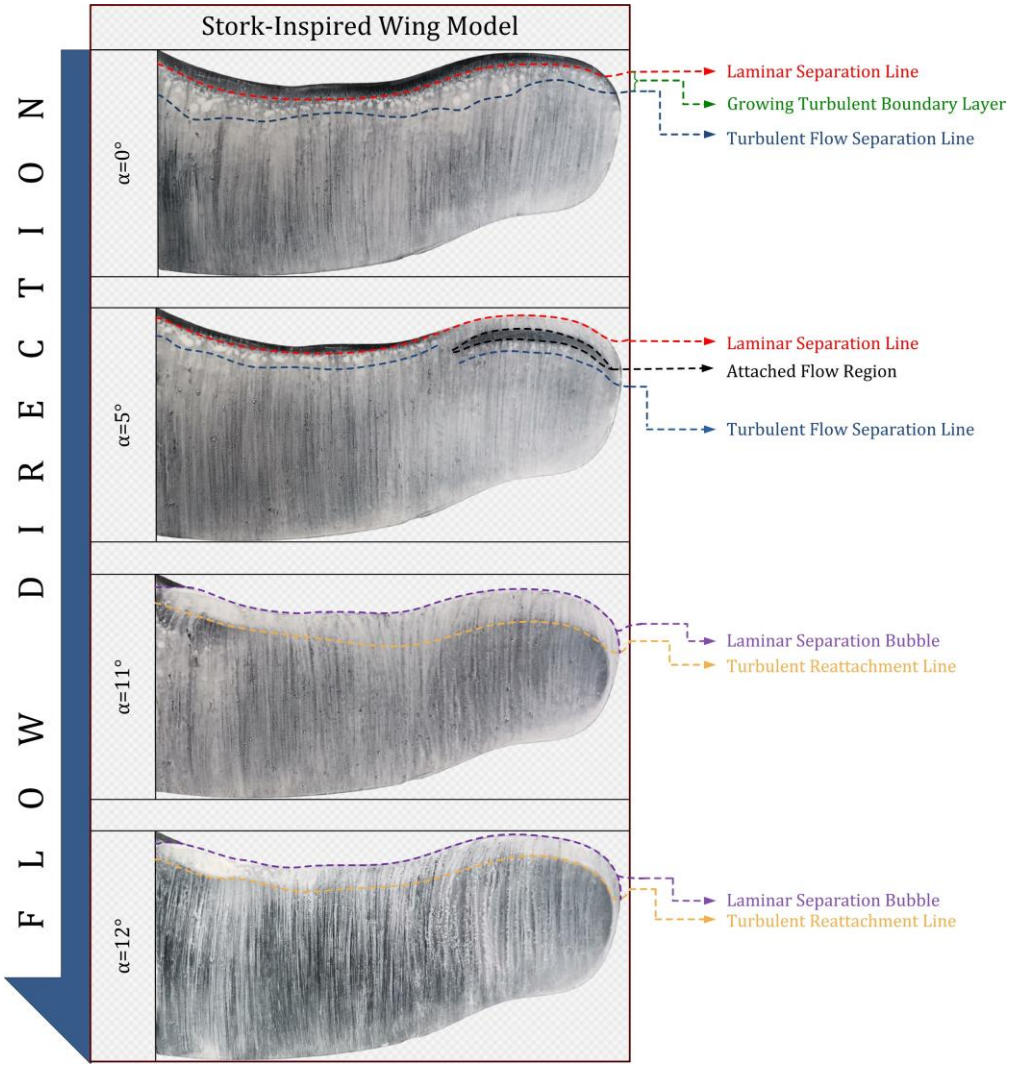


Figure 9. Surface oil flow visualization results of the stork inspired biomimetic wing model

Figure 9 shows the surface flow characteristics of the biomimetic wing model, designed inspired by stork wing morphology, at critical angles of attack 0°, 5°, 11°, 12°. Unlike the base model, the geometric variability along the span results in a relatively more complex local distribution of flow separation and reattachment points. In AoA of 0°, a smooth laminar separation line is observed along the leading edge. Compared to the base model, the biological structure of the stork wing model generates a local adverse pressure gradient at a 5° angle of attack, causing laminar separation followed by turbulent reattachment, which generates the primary attached flow region at the wingtip. When the flow topology is examined in AoA of 11° and 12°, it is observed that a laminar separation bubble forms starting from the leading edge of the wing and the flow reattaches to the wing surface as a turbulent flow region, where a slight sweeping effect is observed.

IV. Conclusion

This study comparatively investigated the aerodynamic performance and flow topology of a biomimetic model, which developed based on the top wing morphology of the stork (Mycteria americana), at Reynolds numbers $6x10^4$ and $1.15x10^5$ compared to the base model. The force measurement results revealed that although the biomimetic wing model produced a lower C_L compared to the base model, it significantly minimized the total C_D at almost all angles of attack. In particular, the stork inspired model exhibited a more stable and gradual C_L behavior in the stall region, confirming the biomimetic form's potential to control flow separation. Surface flow visualization analyses showed that while a wide separation region and a narrowing effective lift area were observed in the base model at 12°, the stork inspired model maintained flow on the surface for a longer period and did not exhibit significant trailing edge separation. In the evaluation of aerodynamic efficiency, it was determined that the biomimetic design provided a significant advantage over the base model, especially at angles of attack of 5°, 6°, 7° and offered an improvement in maximum aerodynamic efficiency. Consequently, it has been proven that the stork wing morphology offers an effective

solution for improving aerodynamic efficiency and reducing stall characteristics by optimizing drag force in the low Reynolds number regime.

ACKNOWLEDGEMENT

This article is supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK 1001 - Scientific and Technological Research Projects Funding Program)-Grant No.123M945.

REFERENCES

[1] Rose, J. B. R., Natarajan, S. G., & Gopinathan, V. T. (2021). Biomimetic flow control techniques for aerospace applications: a comprehensive review. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 20(3), 645-677.
[2] Pakatchian, M. R., Rocha, J., & Li, L. (2023). Advances in riblets design. Applied Sciences, 13(19), 10893.
[3] Ayvazian, A., Alcocel, I. C., & Gowree, E. R. (2022, March). On bio-inspired induced drag reduction techniques. In 56th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics (p. 0).
[4] Moscato, G., Mohamed, J., & Romano, G. P. (2022). Improving performances of biomimetic wings with leading-edge tubercles. Experiments in Fluids, 63(9), 146.
[5] Basri, E. I., Basri, A. A., & Ahmad, K. A. (2023). Computational fluid dynamics analysis in biomimetics applications: a review from aerospace engineering perspective. Biomimetics, 8(3), 319.
[6] Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., & Fish, F. E. (2004). Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (Megaptera novaeangliae) flippers. Physics of fluids, 16(5), L39-L42.
[7] Xu, M., Grabowski, A., Yu, N., Kerezyte, G., Lee, J. W., Pfeifer, B. R., & Kim, C. J. C. (2020). Superhydrophobic drag reduction for turbulent flows in open water. Physical Review Applied, 13(3), 034056.
[8] Liu, Q., Zhu, C., Ru, W., & Hu, Y. (2025). Dragonfly morphology-inspired wing design for enhanced micro-aircraft performance. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 47(2), 86.
[9] Ito, M. R., Duan, C., & Wissa, A. A. (2019). The function of the alula on engineered wings: a detailed experimental investigation of a bioinspired leading-edge device. Bioinspiration & biomimetics, 14(5), 056015.
[10] Altman, A., & Allemand, G. (2016). Post-stall performance improvement through bio-inspired passive covert feathers. In 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (p. 2042).
[11] Bachmann, T. W. (2010). *Anatomical, morphometrical and biomechanical studies of barn owls' and pigeons' wings*(Doctoral dissertation, Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010).
[13] Selig, M. S., Donovan, J. F., & Fraser, D. B. (1989). Airfoils at low speeds.
[14] Tangermann, E., Ercolani, G., & Klein, M. (2022). Aerodynamic behavior of a biomimetic wing in soaring flight–A numerical study. *Flow, Turbulence and Combustion*, *109*(4), 1155-1173.
[15] Robles, G. E., Luna, E. C. R., Tayactac, R. G., Honra, J. P., & Calderon, A. D. (2022, November). Design and Aerodynamic Analysis of a Bio-inspired HAWT with Albatross and Stork Airfoil for Low Wind Velocity using CFD. In *2022 6th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE)* (pp. 37-46). IEEE.
[16] Eder, H., Fiedler, W., & Neuhäuser, M. (2015). Evaluation of aerodynamic parameters from infrared laser tracking of free-gliding white storks. *Journal of Ornithology*, *156*(3), 667-677.
[17] Brønnvik, H., & Flack, A. (2025). Experience and motivation shape the flight performance of white storks migrating long-distance. *Current Biology*, *35*(15), 3736-3744.
[18] Osváth, G., Vincze, O., David, D. C., Nagy, L. J., Lendvai, Á. Z., Nudds, R. L., & Pap, P. L. (2020). Morphological characterization of flight feather shafts in four bird species with different flight styles. *Biological Journal of the Linnean Society*, *131*(1), 192-202.
[19] Keskin, G., Duriez, O., Lacerda, P., Flack, A., & Nagy, M. (2025). Adaptive cross-country optimization strategies in thermal soaring birds. *Science*, *28*(3).
[20] Eder, H., Fiedler, W., & Pascoe, X. (2011). Air-permeable hole-pattern and nose-droop control improve aerodynamic performance of primary feathers. *Journal of Comparative Physiology A*, *197*(1), 109-117.
[21] Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A., 1999. Low-Speed Wind Tunnel Testing, third ed. John Wiley & Sons, New York, USA
[22] Akbıyık, H. (2025). The effect of cavity modified stepped geometry on aerodynamic performance of an airfoil at a low Reynolds number. Physics of Fluids, 37(4).
[23] Tangöz, S. (2024). Investigation of surface flow behaviors on wing model made of different airfoils. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 759-770.
[24] Chen, J.H., Li, S.S., Nguyen, V.T., 2012. The effect of leading-edge protuberances on the performance of small aspect ratio foils. 15th International Symposium on Flow Visualization.
[25] Tangermann, E., Ercolani, G., & Klein, M. (2022). Aerodynamic behavior of a biomimetic wing in soaring flight–A numerical study. Flow, Turbulence and Combustion, 109(4), 1155-1173.
[26] Seyhan, M., Yıldız, A., Colak, A., Yosma, E., Kurdoğlu, Ş., Dokumaci, K., & Cetin, H. (2024). Investigation of aerodynamic characteristics of concept wing design inspired by the sooty shearwater. Physics of Fluids, 36(11).
[27] Tekeoglu, K. N., Akbıyık, H., & Tumen Ozdil, N. F. (2026). Aerodynamic Performance and Flow Structure Analysis of a Swallow-Inspired NACA2415 Airfoil. Bioinspiration & Biomimetics.
[28] Yılmaz, R. C., & Akbıyık, H. (2025). The effects of ice accretion on aerodynamic performance of NACA 2415 airfoil at low Reynolds number: RC Yılmaz et al. Journal of Visualization, 28(4), 749-770.
[29] Monty, J. P., Harun, Z., & Marusic, I. (2011). A parametric study of adverse pressure gradient turbulent boundary layers. International Journal of Heat and Fluid Flow, 32(3), 575-585.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Yeni Nesil Bis-Kalkon Ester Türevinin Sentezi, Korozyon ve Biyolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Mert Gül[a,b], Ertuğrul Kaya[a], Alparslan Atahan[b]*

[a]3-S Mühendislik Müşavirlik San. ve Tic. A.Ş., Düzce/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: mertgul1907@gmail.com

ÖZET

Farmasötik kimya ve malzeme bilimi arasındaki korelasyon çerçevesinde, "moleküler hibridizasyon" stratejisiyle tasarlanan yeni nesil bis-kalkon ester türevleri; bulundukları ortamda ortaya çıkan çoklu tehditlere yanıt verebilen, biyolojik kirlenmeye karşı biyosit etki gösterebilen ve metal yüzeylerde aşınma ile korozyona karşı yüksek afiniteli bir yüzey koruyucu ajan olarak işlev görebilen çok fonksiyonlu yapılardır. Tasarlanan bu özgün hibrit moleküller, ester gruplarının sağladığı optimize edilmiş lipofilisite sayesinde fungal hücre duvarını etkin biçimde aşarak antifungal potansiyelin artırılmasına olanak sağlamaktadır. Eş zamanlı olarak, molekülün endüstriyel metal yüzeylerine (düşük karbon çeliği gibi) güçlü bir şekilde tutunması ve hidrofobik alkil zincirlerinin oluşturduğu etki ile korozyon direncini artırması beklenmektedir. Bu çalışmada sentezlenen bileşiklerin kimyasal yapıları Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi ile karakterize edilmiştir. Bis-kalkon ester türevinin korozyon önleme potansiyeli 1 M HCl ortamında Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve Tafel Polarizasyon (TP) yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Metal yüzeyindeki morfolojik değişimler ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDAX) analizleri ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Bis-kalkon, Ester, O-Asilasyon, Korozyon inhibitörü.*

Synthesis and Investigation of the Corrosion and Biological Properties of New-Generation Bis-Chalcone Ester Derivatives

Mert Gül[a,b], Ertuğrul Kaya[a], Alparslan Atahan[b]*

[a]3-S Engineering Consultation Industry and Commerce Incorporated Company, Düzce/Türkiye.
[b]Düzce University, Faculty of Science and Letters, Department of Chemistry, Düzce/Türkiye.
* Corresponding Author: mertgul1907@gmail.com

ABSTRACT

Next-generation bis-chalcone ester derivatives, designed via a molecular hybridization strategy at the interface of pharmaceutical chemistry and materials science, exhibit a multifunctional architecture capable of responding to multiple threats present in their environment, acting as biocidal agents against biofouling and as high-affinity surface-protective agents against wear and corrosion on metal surfaces. These novel hybrid molecules are expected to maximize antifungal potential by efficiently penetrating the fungal cell wall owing to the optimized lipophilicity conferred by the ester moieties. Simultaneously, their strong adsorption onto industrial metal surfaces (e.g., low-carbon steel) and the barrier effect generated by the hydrophobic alkyl chains are anticipated to enhance corrosion resistance. The chemical structures of the synthesized compounds in this study were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis. The corrosion inhibition performance of the bis-chalcone ester derivative was evaluated in 1 M HCl medium using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and Tafel polarization (TP) techniques. Morphological changes on the metal surface were further assessed by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray analysis (EDAX).

Keywords: *Bis-chalcone, Ester, O-Acylation, Corrosion inhibitor.*

I. INTRODUCTİON

Carbon steels are widely used in chemical, petrochemical, energy, construction, automotive, machinery, and metalworking industries due to their formability, mechanical strength, and suitability for large-scale production [1]. However, they are highly susceptible to corrosion in aggressive acidic environments. Hydrochloric acid is commonly used for surface cleaning, acid pickling, descaling, rust removal, oil well acidizing, and chemical cleaning because it rapidly dissolves iron oxide layers from steel surfaces. Nevertheless, HCl also attacks the underlying metallic iron, where iron is anodically oxidized to Fe^{2+} and hydrogen ions are reduced to hydrogen gas at cathodic sites. Uncontrolled acid treatment may cause metal loss, surface roughening, pitting, and deterioration of mechanical properties [2].

Organic compounds containing heteroatoms such as nitrogen, oxygen, sulfur, and phosphorus are among the most effective corrosion inhibitors. These compounds can interact with the vacant d-orbitals of metal atoms through the lone electron pairs present in their structures. In addition, aromatic rings, conjugated double-bond systems, and high π-electron density are important structural features that enhance adsorption onto metal surfaces. Imidazolines, triazoles, pyridine derivatives, Schiff bases, thiourea derivatives, and benzothiazoles have been extensively studied in this context. In a study by Liu et al., Schiff base derivatives were reported to provide high inhibition efficiency for carbon steel in 1 M HCl. The study emphasized that aromatic rings and conjugated π-electron systems play a significant role in the adsorption mechanism, and that the extended π-electron cloud can interact with the vacant d-orbitals of iron atoms, thereby supporting the formation of a protective film [3].

The effectiveness of organic inhibitors depends on several factors, including molecular geometry, planarity, electron density, solubility, protonation behavior, and hydrophilic/hydrophobic balance. Planar and conjugated structures can provide broader contact with the metal surface, while long alkyl chains can restrict the passage of water and ions by enhancing the hydrophobic barrier effect. Polar functional groups, on the other hand, can strengthen interactions with the metal surface. Therefore, an effective inhibitor molecule should contain active centers capable of binding to the surface and promoting the formation of a stable, compact protective film [4].

Chalcones possess a 1,3-diaryl-2-propen-1-one structure with aromatic rings and an α,β-unsaturated carbonyl system. This conjugated framework enables electron delocalization, structural modification, and interaction with metal surfaces, making chalcone derivatives attractive for applications such as antioxidant activity, UV absorption, electrochemical behavior, polymer additives, and corrosion inhibition. In acidic media, the carbonyl group, C=C bond, and aromatic rings may act as adsorption centers on carbon steel surfaces, forming a protective organic layer. Dos Santos et al. reported that the inhibition efficiency of chalcone derivatives is related to the HOMO–LUMO energy gap, suggesting that electron transfer and back-donation processes support adsorption on the metal surface [5].

Bis-chalcones are especially promising because their extended conjugation, multiple aromatic rings, and increased number of adsorption sites may enhance surface coverage and restrict the access of H^+ and Cl^- ions to the metal/solution interface. The introduction of ester groups can further improve surface activity and hydrophobicity. While carbonyl and ester oxygen atoms may participate in surface interactions, alkyl chains can promote the formation of a water-repellent barrier film [6]. Therefore, bis-chalcone ester derivatives combine π-electron interactions, heteroatom-assisted adsorption, and hydrophobic barrier effects, supporting the formation of a compact protective layer and reducing corrosion at the metal/solution interface [7].

This study aims to evaluate the potential of a novel bis-chalcone-based ester structure as corrosion inhibitor in acidic media. Although various organic inhibitors have been reported, molecules combining a chalcone core, ester functionality, and hydrophobic alkyl chains may offer a molecular-design-based approach for corrosion protection. In this work, the inhibitory effect of the synthesized bis-chalcone ester derivative MGE-1 on St-37 carbon steel in 1 M HCl was investigated. The structure of MGE-1 was confirmed by FT-IR analysis, showing characteristic bands related to carbonyl and ester groups, aromatic rings, and conjugated systems. Its aromatic π-system, carbonyl/ester groups, and hydrophobic character were expected to support adsorption on the steel surface and promote the formation of a protective film. Therefore, EIS and Tafel measurements were performed at different inhibitor concentrations, and the results were supported by SEM–EDAX analyses to evaluate both corrosion inhibition efficiency and surface protection behavior.

II. MATERİALS METHODS

A. Chemicals

Pelargonic acid (C9 fatty acid) was obtained from Matrilox with 98% purity. Sodium bicarbonate ($NaHCO_3$) and ethyl acetate ($C_4H_8O_2$) were obtained from Tekkim with 99% purity. Cyclohexanone ($C_6H_{10}O$), 4-

hydroxybenzaldehyde ($C_7H_6O_2$), methanesulfonic acid (CH_3SO_3H), and sodium sulfate (Na_2SO_4), ethanol (C_2H_5OH), and dioxane ($C_4H_8O_2$) were obtained from Merck and Sigma Aldrich with 99% purity and used without any additional purification.

B. Bis-chalcone and Bis-chalcone Ester (MGE-1) Synthesis

Bis-chalcone derivative was synthesized via a one-pot reaction using cyclohexanone and an aldehyde as starting materials. In this study, 4-hydroxybenzaldehyde was employed as the aldehyde component for the synthesis of the chalcone compound. 1 mol of cyclohexanone and 2 mol of 4-hydroxybenzaldehyde were placed in a reaction flask and reacted under a reflux condenser with HCl as a catalyst in ethanol solvent. The reaction was carried out at 60 °C for 24 hours using a heated magnetic stirrer in a system containing a magnetic stir bar [8]. The bis-chalcone ester compound (MGE-1) was synthesized by esterification of the obtained bis-chalcone intermediate with pelargonic acid. 1 mol of bis-chalcone and 2 mol of fatty acid were reacted in the presence of methanesulfonic acid as a catalyst and dioxane solvent. The reaction was carried out at 80 °C for 6 hours under a reflux condenser, using an electric stirrer and heater on a water bath [9]. After the reaction was complete, ethyl acetate was added to the mixture, and the mixture was transferred to a separatory funnel. The organic phase was washed with a pre-prepared saturated sodium bicarbonate solution and filtered. To remove water from the filtrate, anhydrous sodium sulfate was added and mixed. The mixture was then filtered through a 0.45 μm membrane filter. Finally, the solvent was removed in a rotary evaporator at yielding the final bis-chalcone ester product.

C. Corrosion inhibition studies

The chemical composition of St 37 carbon steel was derived from the relevant literature [10]. For electrochemical tests, St 37 carbon steel specimens with an exposed surface area of 0.75 cm^2 were prepared. The working surfaces were ground with SiC/emery papers from 800 to 2000 grit, polished with diamond paste, rinsed with deionized and running water, degreased with acetone, dried with warm or compressed air, and stored in a desiccator to prevent contamination or oxidation[11]. Electrochemical measurements were performed using a Gamry Potentiostat/Galvanostat/ZRA Interface 1010E system in a conventional three-electrode cell, with St 37 carbon steel as the working electrode, saturated Ag/AgCl as the reference electrode, and platinum as the counter electrode. EIS measurements were conducted from 100 kHz to 0.1 Hz with a 10 mV peak-to-peak perturbation amplitude, and the data were analyzed using ZsimpWin 3.21. Potentiodynamic polarization tests were carried out over ±250 mV versus corrosion potential at a scan rate of 1 mV s^{-1} and evaluated using Gamry Echem Analyst software. Surface morphology and elemental composition were examined by SEM–EDX using a Quanta FEG 250 instrument at 20 keV. SEM images were obtained after 2 h immersion in 1 M HCl, following EIS measurements, to assess corrosion-induced surface changes.

III. RESULTS

A. FT-IR Analysis

The FT-IR spectrum (Figure 1(a)) of the synthesized bis-chalcone compound exhibited a broad band at 3241 cm^{-1} attributed to the phenolic O–H stretch [12], while the bands at 2941 and 2843 cm^{-1} were assigned to aliphatic C–H stretches. The characteristic band at 1645 cm^{-1} indicates conjugated C=O stretching in the α,β-unsaturated ketone system [13]. The bands in the 1593–1509 cm^{-1} range are associated with aromatic/olefinic C=C stretching, while those in the 1282–1108 cm^{-1} region are attributed to phenolic C–O and skeletal vibrations [12]. These data support the formation of a phenolic bis-chalcone structure. Additionally, in the FTIR spectrum of starting material pelargonic acid (Figure 1(b)), the broad absorption observed in the 2500–3300 cm^{-1} range corresponds to the carboxylic acid O–H stretch, the bands around 2920-2850 cm^{-1} correspond to C–H stretches of the long aliphatic chain, and the strong band at approximately 1700–1710 cm^{-1} is attributed to the carboxylic acid C=O stretching characteristic of fatty acids. Also, the C–O vibrations in the 1290–1210 cm^{-1} range support the presence of long-chain fatty acids in the sample [14].

The disappearance of the phenolic O–H band in the FT-IR spectrum of MGE-1 (Figure 1(c)) and the absence of the carboxylic acid O–H band in the 2500–3300 cm^{-1} range confirm the occurrence of esterification (Figure 1 (c)). Furthermore, bands observed in the 2950–2850 cm^{-1} range are assigned to aliphatic C–H stretches of the pelargonic chain, whereas the intense absorption in the 1760–1740 cm^{-1} region corresponds to the ester C=O stretch. Signals in the 1640–1600 cm^{-1} range are associated with conjugated enone/aromatic C=C

vibrations, while those in the 1260–1100 cm^{-1} region indicate ester C–O–C stretching. Ultimately, these spectral findings strongly support the proposed bis-chalcone di-pelargonate structure [15].

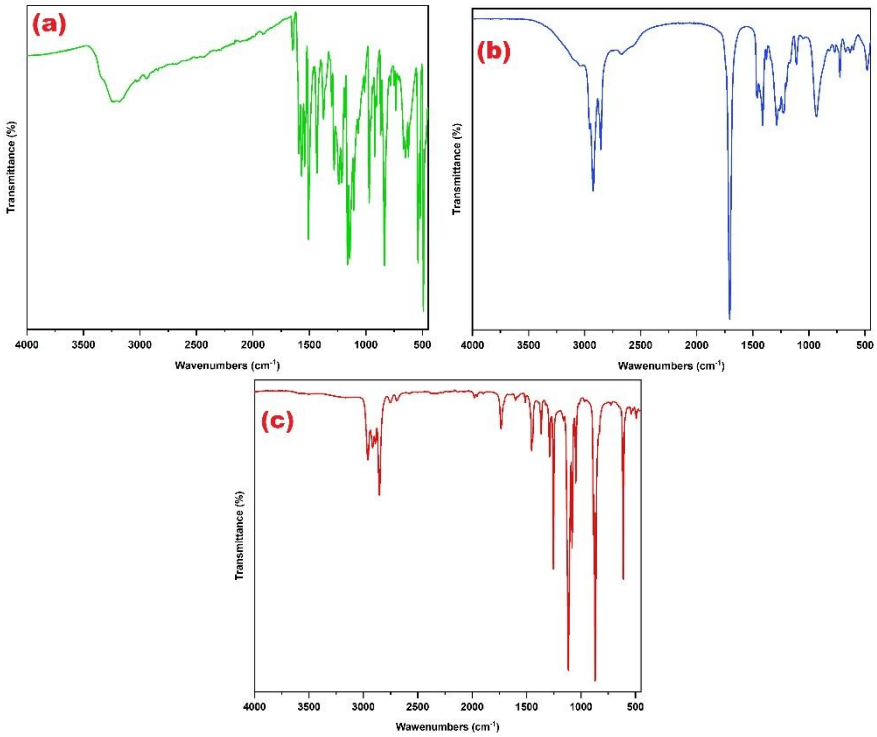


Figure 1. FT-IR spectrum of the synthesized bis-chalcone (a) and pelargonic acid(b), bis-chalcone di-pelargonate (c)

B. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements

The corrosion inhibition performance of the synthesized bis-chalcone-derived ester (MGE-1) was investigated for carbon steel in a 1 M HCl solution using electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The impedance response of the steel electrode in the absence and presence of different concentrations of MGE-1 is presented in the Nyquist plots (Figure 2(a)). In the uninhibited acidic medium, the Nyquist curve exhibited a semicircular profile, indicating that the corrosion process was mainly governed by charge-transfer reactions at the metal solution interface [10].

Following the addition of MGE-1 to the corrosive medium, a clear enlargement of the capacitive loop was observed. This increase became more pronounced with increasing inhibitor concentration, demonstrating the gradual formation of a protective adsorbed film on the steel surface. The larger semicircle diameter in the presence of MGE-1 indicates higher charge-transfer resistance and, therefore, a lower corrosion rate [16]. This behavior serves to confirm that MGE-1 is an effective suppressant of the electrochemical dissolution of carbon steel in hydrochloric acid solution. The depressed semicircles observed in the Nyquist plots can be attributed to frequency dispersion caused by surface heterogeneity, electrode roughness, adsorption of corrosion products and inhibitor molecules, and the formation of a non-uniform interfacial layer. This behavior is typical for corroding steel surfaces in acidic media and indicates a non-ideal capacitive response at the steel/electrolyte interface. The Bode plots supported the Nyquist results, showing that the impedance modulus increased with increasing MGE-1 concentration, especially in the low-frequency region, confirming the enhanced barrier effect of the inhibitor film [17]. The higher phase angle values observed in inhibited solutions also indicate a more capacitive surface response, suggesting that MGE-1 adsorption reduced active corrosion sites and promoted the formation of a protective interfacial layer. Since the phase angles approached 78° at all concentrations, diffusion-controlled behavior can be ruled out [17]. The EIS data were fitted using the *R(QR)* equivalent circuit, where Rs is the solution resistance, R_{ct} is the charge-transfer resistance, and Q represents the constant phase element related to non-ideal double-layer capacitance. The fitting was performed using ZSimpWin 3.21, and low χ^2 values indicated good agreement between experimental and fitted data. The results showed that R_{ct} increased markedly in the presence of MGE-1, particularly at higher concentrations, confirming its concentration-dependent inhibition behavior. In contrast, the double-layer capacitance-related parameter decreased, which may be due to the replacement of water molecules and chloride ions on the steel surface by adsorbed MGE-1 molecules. The calculated EIS parameters are presented in Table 1.

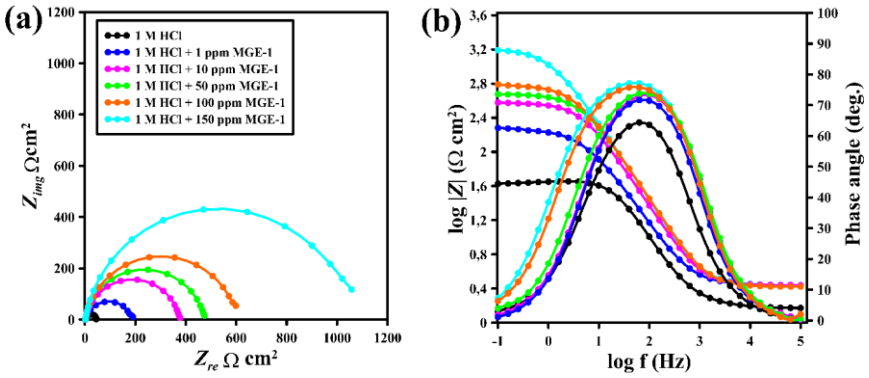


Figure 2. Electrochemical impedance spectra of (a) Nyquist, (b) Bode modulus and Bode phase angle representations for St 37 carbon steel in 1 M HCl solution in the absence and presence of MGE-1 at different concentrations.

The increase in inhibitor concentration led to an increase in the *n* value, which gradually approached unity. This behavior indicates that the St 37 carbon steel surface exhibited a more capacitive response in the presence of MGE-1, suggesting the formation of a more homogeneous and protective interfacial layer [18]. In addition, the charge-transfer resistance (R_{ct}) values obtained in the inhibited solutions were considerably higher than those recorded for the uninhibited 1 M HCl medium. The continuous increase in R_{ct} with increasing MGE-1 concentration demonstrates that the electron-transfer process at the metal/solution interface was progressively suppressed. In contrast to the trend observed for R_{ct}, the double-layer capacitance-related parameter (Q) decreased with the addition of MGE-1. This reduction can be attributed to the adsorption of MGE-1 molecules on the St 37 carbon steel surface, replacing water molecules and aggressive chloride ions at the interface. Consequently, the adsorbed inhibitor molecules formed a protective barrier film, which became more compact and effective as the inhibitor concentration increased. Therefore, the decrease in corrosion rate in 1 M HCl can be mainly associated with the concentration-dependent adsorption of MGE-1 and the gradual development of a protective organic layer on the steel surface [19].

Table 1. Electrochemical impedance parameters for St 37 carbon steel in 1 M HCl solution in the presence and absence of MGE-1 different concentrations

Inhibitor concentration	Rs (Ω cm^2)	Y0 (Ω^{-1} s^2 cm^{-2})	n $0 \le n \le 1$	Rct (Ω cm^2)	IE (%)	Chi-square
Blank	1.80	0.000353	0.65	78.10	-	9.560E-4
1 ppm MGE-1	2.72	0.000289	0.85	192.80	59.49	9.121E-4
10 ppm MGE-1	2.72	0.000106	0.90	370.60	78.93	9.204E-4
50 ppm MGE-1	2.74	0.000103	0.91	464.80	83.20	9.554E-4
100 ppm MGE-1	2.73	0.000099	0.91	594.80	86.87	9.612E-4
150 ppm MGE-1	2.82	0.000067	0.92	1085.00	92.80	8.854 E-4

The electrochemical parameters obtained from EIS fitting are summarized in Table 1. The solution resistance (R_s) of St 37 carbon steel in the uninhibited 1 M HCl solution was determined as 1.80 Ω cm^2. In the absence of MGE-1, the R_{ct} value was 78.1 Ω cm^2, while the Q value was calculated as 0.000353 Ω^{-1} s^n cm^{-2}. After the addition of 1 ppm MGE-1, the R_s and R_{ct} values increased to 2.72 Ω cm^2 and 192.8 Ω cm^2, respectively, whereas the Q value decreased to 0.000289 Ω^{-1} s^n cm^{-2}. This result confirms that even a low concentration of MGE-1 improved the resistance of the steel surface against charge transfer. A more pronounced inhibition effect was observed at higher inhibitor concentration. In the presence of 150 ppm MGE-1, the R_s and R_{ct} values increased further to 2.82 Ω cm^2 and 1085.0 Ω cm^2, respectively, while the Q value decreased significantly to 0.000067 Ω^{-1} s^n cm^{-2}. The marked increase in R_{ct}, together with the decrease in Q, clearly indicates that MGE-1 molecules adsorbed effectively onto the steel surface and enhanced the protective character of the interfacial film. The highest inhibition efficiency calculated from EIS measurements was 92.8% at 150 ppm MGE-1, confirming the strong corrosion inhibition performance of the synthesized bis-chalcone-derived ester in 1 M HCl solution.

C. Tafel polarization (TP) studies

Figure 3. presents the potentiodynamic polarization curves of St 37 carbon steel recorded in 1 M HCl solution at 25 °C in the absence and presence of different concentrations of the synthesized bis-chalcone-derived ester inhibitor, coded as MGE-1. The corresponding electrochemical polarization parameters, including anodic Tafel slope (β_a), cathodic Tafel slope (β_c), corrosion potential (E_{corr}), corrosion current

density (I_{corr}) and inhibition efficiency (IE%), are summarized in Table 2. The inhibition efficiency values obtained from Tafel polarization measurements were calculated using Equation 1 [20].

$$\%\eta TP = \frac{I_{corr(Blank)} - I_{corr(Inh)}}{I_{corr\ (Blank)}} \quad (1)$$

As seen from the polarization curves (Figure 3), the addition of MGE-1 caused a significant decrease in the corrosion current density of St 37 carbon steel in 1 M HCl solution. This decrease became more pronounced with increasing inhibitor concentration, indicating that MGE-1 effectively reduced the corrosion rate of the steel surface in the acidic environment. In particular, the cathodic branches of the polarization curves shifted toward lower current densities in the presence of MGE-1, suggesting that the inhibitor strongly suppressed the cathodic hydrogen evolution reaction [21].

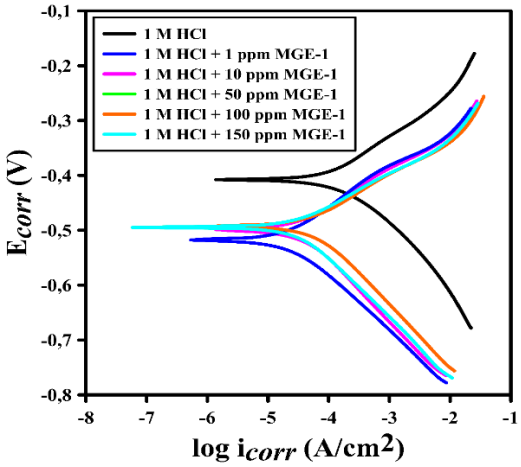


Figure 3. Tafel polarization plots for St 37 carbon steel in 1 M HCl solution in the absence and presence of MGE-1 at different concentrations.

The corrosion potential of uninhibited St 37 carbon steel in 1 M HCl was -408.00 mV vs. Ag/AgCl. Upon addition of MGE-1, Ecorr shifted noticeably toward more negative values, ranging from -533.00 mV at 1 ppm to -493.40 mV at 150 ppm. This shift indicates that MGE-1 predominantly affects the cathodic reaction. Since the E_{corr} displacement is close to or greater than 85 mV compared with the blank solution, MGE-1 can be classified as a mainly cathodic-type inhibitor. However, the decrease in anodic current densities also suggests partial suppression of steel dissolution[19]. The changes in Tafel slopes support this behavior. The β_c values varied from 119.80 mV dec in the blank solution to 148.80–203.30 mV dec in inhibited media, indicating that MGE-1 influenced the cathodic hydrogen evolution kinetics. Meanwhile, variations in βa show that the anodic dissolution process was also affected to some extent. Therefore, MGE-1 acts mainly as a cathodic inhibitor while also partially reducing anodic steel dissolution through surface adsorption [19].

Table 2. Tafel polarization parameters for St 37 carbon steel in 1 M HCl solution in the presence and absence of MGE-1 different concentrations

Inhibitor concentration	$-\beta_a$ (mV/dec)	$-\beta_c$ (mV/dec)	E_{corr} ($mV_{Ag/AgCl}$)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	IE (%)
1 M HCl	100.60	119.80	-408.00	185.00	-
1 ppm MGE-1	99.70	148.80	-533.00	88.00	52.43
10 ppm MGE-1	110.80	168.80	-517.60	48.00	74.05
50 ppm MGE-1	108.90	206.20	-498.50	26.20	85.84
100 ppm MGE-1	91.30	217.50	-499.00	21.40	88.43
150 ppm MGE-1	93.50	203.30	-493.40	14.40	92.22

As shown in Table 2, the corrosion current density of St 37 carbon steel in uninhibited 1 M HCl was 185.00 μA cm^{-2}. The introduction of only 1 ppm MGE-1 decreased the I_{corr} value to 88.00 μA cm^{-2}, corresponding to an inhibition efficiency of 52.43%. Increasing the inhibitor concentration resulted in a continuous decrease in corrosion current density. At 10 ppm, 50 ppm, and 100 ppm MGE-1, the I_{corr} values decreased to 48.00, 26.20, and 21.40 μA cm^{-2}, respectively, with corresponding inhibition efficiencies of 74.05%, 85.84%, and 88.43%. The most pronounced corrosion protection was obtained at the highest inhibitor concentration. In the presence of 150 ppm MGE-1, the corrosion current density was reduced to 14.40 μA cm^{-2}, giving a

maximum inhibition efficiency of 92.22%. This strong decrease in I_{corr} confirms the ability of MGE-1 molecules to adsorb effectively onto the St 37 carbon steel surface and form a protective organic layer that limits the access of aggressive H^+ and Cl^- ions to the metal/electrolyte interface. Overall, the Tafel polarization results demonstrate that MGE-1 significantly enhances the corrosion resistance of St 37 carbon steel in 1 M HCl solution. The concentration-dependent reduction in corrosion current density and the high inhibition efficiency at 150 ppm are in good agreement with the EIS results, confirming that the synthesized bis-chalcone-derived ester acts as an efficient corrosion inhibitor in strongly acidic media.

D. SEM and EDAX

The SEM micrographs of St 37 carbon steel surfaces after EIS measurements in 1 M HCl are shown in Figure 4. The untreated surface exhibited grinding marks but remained relatively smooth and uniform (Figure 4(a)). In contrast, the steel immersed in uninhibited 1 M HCl showed severe corrosion damage, including numerous pits with irregular shapes and sizes (Figure 4(b)), indicating chloride-induced localized corrosion. In the presence of MGE-1, the surface was considerably improved (Figure 4(c)). The number and depth of corrosion pits decreased, and the surface appeared partially covered by a protective layer. This suggests that MGE-1 adsorbed onto the steel surface and formed a barrier film, reducing direct contact between the metal and the acidic medium. EDAX results (Table 3) supported the SEM observations. Before immersion, the steel surface mainly consisted of Fe (98.67%) with minor amounts of C, Si, Mn, S, and P. After immersion in uninhibited 1 M HCl, the Fe content decreased sharply to 39.93%, while O and Cl increased to 44.12% and 14.58%, respectively, confirming the formation of oxide- and chloride-containing corrosion products[19]. When MGE-1 was added to the corrosive medium, significant changes in the surface composition were observed. In the presence of 1 ppm MGE-1, the Fe content increased to 57.52%, whereas the O and Cl contents decreased to 24.60% and 5.56%, respectively. A further improvement was obtained at 150 ppm MGE-1, where the Fe content increased to 63.02%, while the O and Cl contents decreased to 18.88% and 2.05%, respectively. The reduction in oxygen and chlorine contents indicates that the formation of corrosion products was effectively suppressed in the presence of the inhibitor. Moreover, the increase in carbon content on the inhibited surfaces supports the adsorption of organic MGE-1 molecules onto the steel surface.

Table 3. EDAX analysis results of MGE-1 carbon steel in 1 M HCl solution.

	Fe	O	C	Cl	Mn	P	S	Si
Before experiment	98.67	-	0.1		0.3	0.4	0.33	0.2
After immersion in 1 M HCl solution	39.93	44.12	0.15	14.58	0.26	0.33	0.38	0.25
1 ppm MGE-1	57.52	24.60	11.15	5.56	0.22	0.35	0.33	0.27
150 ppm MGE-1	63.02	18.88	15.15	2.05	0.21	0.30	0.21	0.18

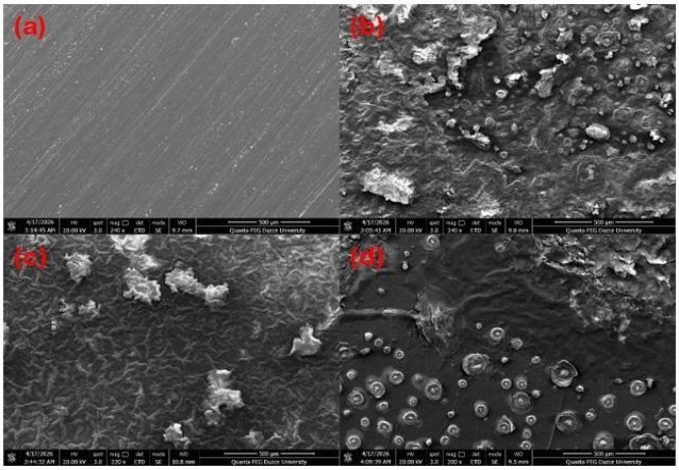


Figure 7. SEM images showing the surface morphology of the St 37 carbon steel sample (a) before immersion in 1 M HCl solution (b) after immersion in 1 M HCl solution, (c) containing 1 ppm MGE-1 and (d) containing 150 ppm MGE-1.

Overall, the SEM and EDAX results demonstrate that MGE-1 provides effective protection for St 37 carbon steel in 1 M HCl solution. The inhibitor molecules absorb on the metal surface and form a protective film, which reduces pit formation, limits the accumulation of oxide and chloride corrosion products, and improves the surface integrity of the steel. The protective effect becomes more pronounced with increasing inhibitor concentration, particularly at 150 ppm MGE-1.

IV. Conclusion

In this study, the bis-chalcone ester derivative MGE-1 was successfully synthesized and evaluated as a corrosion inhibitor for St-37 carbon steel in 1 M HCl solution. The electrochemical results demonstrated that MGE-1 provides effective corrosion protection by forming a protective film on the steel surface. The increase in charge-transfer resistance obtained from EIS measurements and the decrease in corrosion current density observed in Tafel polarization curves confirmed the inhibitory effect of the compound. Surface analyses further supported the electrochemical findings. SEM–EDAX results showed that the presence of MGE-1 significantly reduced surface damage and decreased the oxygen and chlorine contents on the steel surface, indicating suppression of corrosion product formation. The inhibition performance of MGE-1 can be attributed to the combined effect of its aromatic rings, conjugated π-system, ester groups, and hydrophobic alkyl chains, which promote adsorption and barrier film formation on the metal surface. The highest inhibition efficiency was achieved at 150 ppm, reaching 92.80% according to EIS and 92.22% according to Tafel measurements. These results indicate that bis-chalcone ester derivative, MGE-1, is a promising organic corrosion inhibitors for the protection of carbon steel in acidic environments.

Acknowledgements

This study was supported and financed by Düzce University Scientific Research Projects Unit (DÜBAP) (Project number: 2026.05.03.1685). The present work was supported by the 3-S Engineering.

References

[1] B. Wang, Y. Liu, H. Yao, D. Li, Y. Chen, X. Wang, M. Lu, "Corrosion and inhibitor adsorption behavior of carbon steel in an ultra high-flow-velocity wet gas environment using a flow loop system," *Journal of Material Engineering Performance,* 34, 28619–28631, 2025.

[2] E. Khamis, A.M. Abdel-Gaber, M. Morshidy, M.E. Mohamed, "Eco-friendly inhibitors for sustainable corrosion protection of mild steel under oilfield acidizing conditions," *Scientific Report.* 15, 42549, 2025.

[3] H. Liu, L. Zhu, Q. Zhao, "Schiff base compound as a corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl," *Research on Chemical Intermediates*, 41, 4943–4960, 2015.

[4] L. Tan, J. Li, X. Zeng, "Revealing the correlation between molecular structure and corrosion inhibition characteristics of n-heterocycles in terms of substituent groups," *Materials*, 16, 2148, 2023.

[5] V. M. dos Santos, C.M. Fernandes, M.T.G. Sampaio, K.R. Lucio, J.A.C. Velasco, F.L. Salazar, L.X. Alvarez, H. Lgaz, E.A. Ponzio, "Integrating experimental and ab initio DFT approaches to evaluate chalcone derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in acidic environment," *Journal of Molecular Liquids*, 418, 126704, 2025.

[6] A. A. Al-Amiery, W.N.R.W. Isahak, W.K. Al-Azzawi, "Corrosion inhibitors: Natural and synthetic organic inhibitors," *Lubricants* 11, 174, 2023.

[7] K.M. Shwetha., B.M. Praveen, B.K. Devendra, "A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment," *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100258, 2024.

[8] T. Stoylkova, T. Stanimirova, C.D. Chanev, P. Petrova, K. Metodieva, "Mixed oxides as catalysts for the condensation of cyclohexanol and benzaldehyde to obtain a claisen–schmidt condensation product, Catalysts" 14, 445, 2024.

[9] A. A. N. M. Al-Haimi, F. Yehia, F. Liu, C. Yang, S. Zhu, Z. Wang, "Introducing two novel methanesulfonic acid-based deep eutectic solvents as efficient green catalysts for enhanced esterification reaction: insights into kinetics and industrial feasibility", Arabian Journal for Science and Engineering 50, 20851–20870, 2025.

[10] E. Kaya, M. Özdinçer, O. Canayakın, "Renewable sourced castor oil based corrosion inhibitor: Electrochemical investigation, theoretical modeling and study of corrosion efficacy in St-37 carbon steel against 1 M HCl media", Journal of Molecular Liquids, 439, 128823, 2025

[11] M. M. Solomon, H. Gerengi, T. Kaya, S.A. Umoren, "Enhanced corrosion inhibition effect of chitosan for St37 in 15% H2SO4 environment by silver nanoparticles", International Journal of Biological Macromolecules. 104, 638–649, 2017.

[12] M. Homocianu, D. Serbezeanu, A.M. Macsim, T. Vlad-Bubulac, "From cyclohexanone to photosensitive polyesters: Synthetic pathway, basic characterization, and photo-/halochromic properties", Journal of Molecular Liquids. 316, 113888, 2020.

[13] D. A. Zainuri, S. Arshad, N.C. Khalib, I.A. Razak, R.R. Pillai, S.F. Sulaiman, N.S. Hashim, K.L. Ooi, S. Armaković, S.J. Armaković, C.Y. Panicker, C. Van Alsenoy, "Synthesis, XRD crystal structure, spectroscopic characterization (FT-IR, 1H and 13C NMR), DFT studies, chemical reactivity and bond dissociation energy studies using molecular dynamics simulations and evaluation of antimicrobial and antioxidant activities of a novel chalcone derivative, (E)-1-(4-bromophenyl)-3-(4-iodophenyl)prop-2-en-1-one", Journal of Molecular Structure. 1128, 520–533,2017.

[14] Y. B. Che Man, G. Setiowaty, "Application of Fourier transform infrared spectroscopy to determine free fatty acid contents in palm olein", Food Chemistry. 66, 109–114, 1999.

[15] C. Chen, R. Liang, S. Xia, D. Hou, B. Abdoulaye, J. Tao, B. Yan, Z. Cheng, G. Chen, "Fast characterization of biodiesel via a combination of ATR-FTIR and machine learning models", Fuel 332, 126177, 2023.

[16] R. Menaka, S. Subhashini, "Chitosan Schiff base as eco-friendly inhibitor for mild steel corrosion in 1 M HCl", J. Adhes. Sci. Technol. 30, 1622–1640, 2016.

[17] M. M. Solomon, H. Gerengi, S.A. Umoren, N.B. Essien, U.B. Essien, E. Kaya, "Gum Arabic-silver nanoparticles composite as a green anticorrosive formulation for steel corrosion in strong acid media", Carbohydr. Polym. 181, 43–55, 2018.

[18] H. Gerengi, N. Sen, I. Uygur, E. Kaya, "Corrosion behavior of dual phase 600 and 800 steels in 3.5 wt.% NaCl environment", J. Adhes. Sci. Technol. 34, 903–915, 2020.

[19] A. Ince, I. Koramaz, E. Kaya, B. Karagoz, "An easy route for preparation of carboxylic acid and urea functional block copolymer as corrosion inhibitor", J. Adhes. Sci. Technol. 38, 597–617, 2024.

[20] A. Ali Fathima Sabirneeza, S. Subhashini, "A novel water-soluble, conducting polymer composite for mild steel acid corrosion inhibition", J. Appl. Polym. Sci. 127, 3084–3092, 2013.

[21] G. Banuprakash, B.M. Prasanna, B.M. Santhosh, A.M. Guruprasad, R.S. Malladi, “Corrosion Inhibitive Capacity of Vanillin-Based Schiff Base for Steel in 1 M HCl”, Journal of Failure Analysis and Prevention 21, 89–96, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Kelkit Havzasında Sıcaklık ve Nem Etkileşimi Altında İklim Değişikliği Eğilimleri

Sefa Furkan Selçuk[a], Burcu Çirci Selçuk[b]*

[a]Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Artvin/Türkiye.
[b]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mimarlık, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Sivas/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** sefafurkan.selcuk@artvin.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Kelkit Havzası'nda yer alan Şebinkarahisar ve Suşehri meteoroloji istasyonlarına ait 1990–2023 dönemi günlük iklim verileri kullanılarak sıcaklık, bağıl nem ve buhar basıncı açığı (BBA) değişkenlerinin zamansal değişimleri, eğilimleri ve aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Eğilimlerin belirlenmesinde otokorelasyon etkisini dikkate alan modifiye Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim yöntemi uygulanmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkiler Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki istasyonda da sıcaklık serilerinde istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimlerinin bulunduğunu göstermiştir. Şebinkarahisar istasyonunda bağıl nem serisinde anlamlı bir azalma, buna karşılık BBA serisinde güçlü bir artış eğilimi belirlenmiştir. Suşehri istasyonunda ise sıcaklık artışına rağmen bağıl nem ve BBA serilerinde anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Korelasyon analizi sonuçları, her iki istasyonda da sıcaklık ile bağıl nem arasında negatif, sıcaklık ile BBA arasında ise çok güçlü ve pozitif ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, Kelkit Havzası'nda gözlenen ısınma eğiliminin özellikle bazı kesimlerde atmosferik buharlaşma talebini artırarak kuraklık riskini güçlendirdiği, buna karşın nem bileşenlerinin istasyon bazında farklı tepkiler verdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, bölgesel iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde sıcaklık, bağıl nem ve buhar basıncı açığı değişkenlerinin birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Buhar basıncı açığı, İklim değişikliği, Kelkit havzası, Trend analizi.*

Climate Change Trends in the Kelkit Basin Under the Interaction of Temperature and Humidity

ABSTRACT

In this study, temporal variations, trends, and interrelationships among temperature, relative humidity, and vapor pressure deficit (VPD) were investigated using daily climate data from the Şebinkarahisar and Suşehri meteorological stations located in the Kelkit Basin for the period 1990–2023. Modified Mann–Kendall test accounting for autocorrelation and Sen's slope estimator were applied to identify trends. Relationships among variables were evaluated using Spearman's rank correlation coefficient. The results indicated statistically significant increasing trends in temperature at both stations. At the Şebinkarahisar station, a significant decreasing trend in relative humidity and a strong increasing trend in VPD were detected. In contrast, although temperature increased at the Suşehri station, no significant trends were identified in relative humidity and VPD. Correlation analysis revealed negative relationships between temperature and relative humidity and very strong positive relationships between temperature and VPD at both stations. Overall, the observed warming trend in the Kelkit Basin has intensified atmospheric evaporative demand, particularly at the Şebinkarahisar station, thereby increasing potential drought risk, whereas humidity-related responses differed between stations. These findings highlight the importance of jointly considering temperature, relative humidity, and vapor pressure deficit in assessing the impacts of regional climate change.

Keywords: *Climate change, Kelkit basin, Trend analysis, Vapor pressure deficit.*

I. GİRİŞ

İklim değişikliği, sıcaklık rejimleri ve atmosferik nem koşullarında gözlenen kalıcı kaymalar yoluyla su döngüsünü, ekosistemleri ve toplumsal faaliyetleri doğrudan etkilemektedir. Ortalama sıcaklıklardaki artış ve bağıl nem dinamiklerindeki değişim, yalnızca ısıl ortamı değil, aynı zamanda atmosferin nem tutma kapasitesini ve buharlaşma-talep dengesini de değiştirmektedir. Bu bağlamda sıcaklık–nem etkileşiminin uzun dönemli değişimi, iklim değişikliğinin yerel ölçekte nasıl hissedildiğine ilişkin güçlü bir göstergedir [1]-[3].

Türkiye, Akdeniz iklim kuşağıyla Karadeniz etkileri arasında yer alan geçiş özellikleri nedeniyle hidroklimatik açıdan duyarlı bir coğrafyadır. Kelkit Havzası, topoğrafyası ve konumsal özelliği gereği Karadeniz'in nispeten nemli havasıyla İç Anadolu'nun daha kurak karakteri arasında bir eşik bölge oluşturur [4], [5]. Bu eşik konum, havzada sıcaklık artışı ile bağıl nemdeki değişimin birlikte değerlendirilmesini özellikle önemli kılar. İki değişkenin eşzamanlı yönelimi, bölgesel atmosferik kuruma süreçlerini ve su kaynakları üzerindeki potansiyel baskıyı belirginleştirir.

Mevcut literatürde Türkiye ölçeğinde sıcaklık ve yağış eğilimlerine yönelik çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte [6]-[8], sıcaklık–bağıl nem etkileşiminin uzun dönemli seyri ve bunun buhar basıncı açığı (BBA) gibi türetilmiş göstergeler üzerinden iklimsel yorumlanışı daha sınırlı ele alınmıştır [9]. Kelkit Havzası özelinde ise sıcaklığın nem ve buhar basıncı açığı ile ilişkisinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, havzanın 1990–2023 dönemindeki iklim değişikliğini sıcaklık, bağıl nem ve BBA ekseninde bütüncül bir çerçevede değerlendirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Kelkit Havzası'nda yer alan Şebinkarahisar ve Suşehri istasyonlarına ait 1990–2023 dönemi iklim verileri kullanılarak sıcaklık, bağıl nem ve buhar basıncı açığı değişkenlerinin zamansal değişimlerini ve eğilimlerini ortaya koymak ve sıcaklık ile nem bileşenleri arasındaki ilişkileri değerlendirmektir. Bu kapsamda, söz konusu değişkenler için modifiye Mann-Kendall ve Sen'in eğim yöntemleri uygulanmış, ayrıca sıcaklık ile bağıl nem ve buhar basıncı açığı arasındaki ilişkiler Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılarak analiz edilmiştir.

II. MATERYAL METOT

A. Çalışma Alanı ve Veri Seti

Kelkit Havzası, Türkiye'nin kuzeydoğusunda Doğu Karadeniz ile İç Anadolu Bölgeleri arasında yer almakta olup, doğal çevresel özellikler bakımından belirgin bir geçiş kuşağı niteliği taşımaktadır. Doğu–batı doğrultusunda uzanan dar ve uzun vadi formu, havzanın jeomorfolojik yapısını belirleyen temel unsurlardan biridir. Havzanın hidrolojik sistemini, Yeşilırmak Nehri'nin en önemli kollarından biri olan Kelkit Irmağı oluşturmaktadır. Bu akarsu, havza genelinde tarım, yerleşim ve doğal ekosistemlerin şekillenmesinde belirleyici bir role sahiptir. Topoğrafik özellikler, yerleşim ve arazi kullanım desenleri üzerinde doğrudan etkilidir. Yükseltinin doğudan batıya doğru azalmasına bağlı olarak, vadi tabanlarında yerleşim yoğunluğu ve tarımsal faaliyetler artmakta; buna karşılık doğu kesimlerdeki yüksek ve engebeli alanlar yerleşim açısından daha sınırlı koşullar sunmaktadır [10], [11].

Çalışma alanı, İç Anadolu ile Orta Karadeniz Bölgeleri arasında yer alan iklimsel bir geçiş zonunda bulunması nedeniyle, farklı iklim tiplerinin etkisini eş zamanlı olarak yansıtmaktadır. Araştırma sahasında genel olarak Orta Karadeniz Bölümü'nün ılıman iklim özellikleri hâkim olmakla birlikte, yaz aylarında yağış miktarlarının azalması ve Akdeniz kökenli hava kütlelerinin etkisi dikkat çekmektedir. Bu iklimsel farklılaşma ve geçişlilik, havza genelinde sıcaklık, yağış rejimi ve nem koşullarında mekânsal değişkenliğe yol açmakta; aynı zamanda doğal bitki örtüsünün dağılımında da belirgin bir çeşitlilik oluşturmaktadır [4], [5], [12].

Çalışma için gerekli olan sıcaklık ve bağıl nem verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne ait ölçüm istasyonlarından 1990-2023 yılları için günlük veri olarak temin edilmiştir. Alanda iki adet meteorolojik ölçüm istasyonu bulunmaktadır. İstasyonlara ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. MGM istasyonlarına ait bilgiler

İstasyon Adı	Boylam	Enlem	Rakım
Şebinkarahisar	38°25'9.6" Doğu	40°17'13.8" Kuzey	1374
Suşehri	38°4'30.6" Doğu	40°9'44.4" Kuzey	1163

B. BBA (Buhar Basıncı Açığı) Hesaplaması

Belirli bir hava sıcaklığı için, BBA, doygunluk ve gerçek buhar basıncı arasındaki farktır. Doygun buhar basıncı sıcaklığın bir fonksiyonudur ve Tetens formülü (Denklem 1) ile hesaplanabilir [13].

$$e^0(T) = 0{,}6108 * exp(\frac{17{,}37*T}{T+237{,}3}) \quad (1)$$

Burada T, hava sıcaklığıdır (°C); $e^0(T)$ T sıcaklığındaki doymuş su buharı basıncıdır (kPa).

Yukarıdaki denklem doğrusal olmayan bir fonksiyon olduğundan, aylık ölçek gibi daha uzun bir zaman aralığındaki ortalama doymuş buhar basıncı için, günlük T_{max} ve T_{min} yerine ortalama sıcaklık kullanılırsa, ortalama doymuş buhar basıncı tahmini düşük olur ve karşılık gelen buhar basıncı farkı küçülür. Bu nedenle, hesaplama için o zaman aralığındaki günlük ortalama T_{max} ve T_{min}'e karşılık gelen doymuş buhar basıncının ortalama değeri kullanılır (Denklem 2) [3], [14].

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (2)$$

Burada, e_s ortalama doymuş buhar basıncı (kPa), Tmax ve Tmin ortalama günlük maksimum ve minimum hava sıcaklıklarıdır (°C). Gerçek buhar basıncı(kPa) değeri e_a, aylık ortalama bağıl nemden (RH) hesaplanır (Denklem 3). Buhar basıncı açığı ise Denklem 4 ile hesaplanır.

$$e_a = e_s * \frac{RH}{100} \quad (3)$$

$$BBA = e_s - e_a \quad (4)$$

Trend Analizi

Değişkenlerin uzun dönemli eğilimlerini belirlemek amacıyla Modifiye Mann–Kendall (MMK) testi ve Sen's Slope yöntemi kullanılmıştır. MMK testi, klasik Mann–Kendall yönteminin otokorelasyon etkisini dikkate alan geliştirilmiş versiyonudur ve iklim serilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Analizler R ortamında "modifiedmk" paketi aracılığıyla yürütülmüştür. Trend analizleri günlük veriler üzerinden yürütülmüştür.

MMK testinden elde edilen Z istatistiğinin pozitif olması, ilgili değişkende zaman içinde artan bir eğilimin varlığına; negatif olması ise azalan bir eğilimin bulunduğuna işaret etmektedir. $p < 0.05$ koşulunu sağlayan sonuçlar, belirlenen eğilimin %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Eğilimin yalnızca yönü değil, aynı zamanda büyüklüğü de Sen'in eğim katsayısı ile nicel olarak ifade edilmiştir. Bu katsayı, ilgili parametredeki günlük değişim miktarını ortaya koyarak zamansal değişimin şiddetini değerlendirme imkânı sunmaktadır.

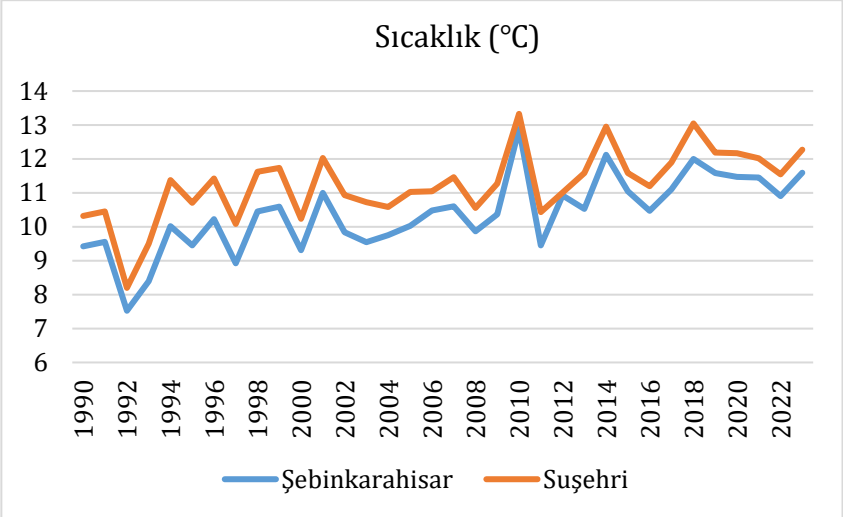
C. Korelasyon Analizi

Kelkit Havzası'nda ortalama hava sıcaklığı ile bağıl nem ve buhar basıncı açığı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Günlük iklim serilerinin normal dağılım varsayımını sağlamaması ve uç değerlere duyarlı olması nedeniyle, değişkenler arasındaki ilişkiler Spearman sıra korelasyon katsayısı (ρ) kullanılarak değerlendirilmiştir [16]. Korelasyon analizleri, R yazılımında "Hmisc" paketinde yer alan "rcorr()" fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm korelasyon testlerinde istatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ olarak kabul edilmiştir. Analiz kapsamında, her bir istasyon için T_{ort}-RH ve T_{ort}-BBA ilişkileri ayrı ayrı değerlendirilerek, sıcaklık değişimlerinin atmosferik nem koşulları ve buharlaşma talebi üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

III. SONUÇLAR

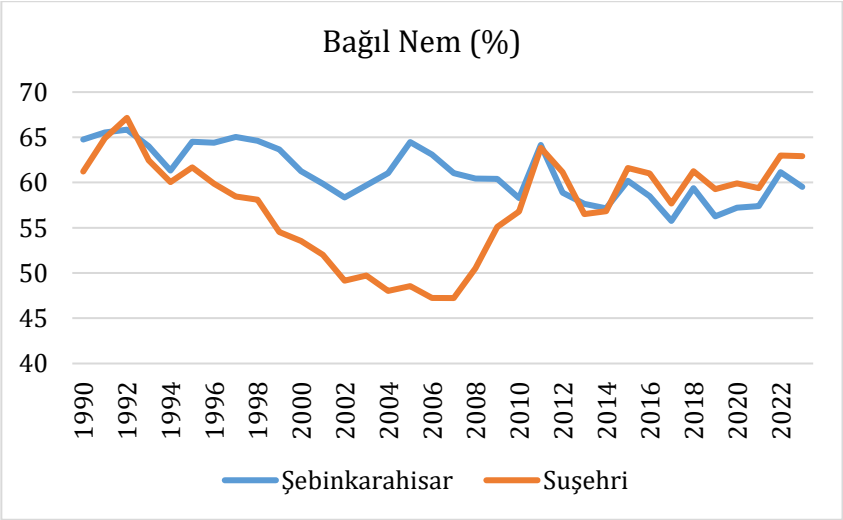
Bu bölümde, Kelkit Havzası'nda 1990–2023 dönemi iklim verileri kullanılarak elde edilen zamansal değişim, eğilim ve değişkenler arası ilişkilere yönelik bulgular sunulmuştur. İlk olarak sıcaklık, bağıl nem ve buhar basıncı açığı serilerinin zamansal değişimleri değerlendirilmiş, ardından modifiye Mann-Kendall ve Sen'in eğim yöntemi ile eğilim analizleri gerçekleştirilmiş ve son olarak sıcaklık ile nem değişkenleri arasındaki ilişkiler Spearman korelasyon katsayısı kullanılarak incelenmiştir. Tüm istatistiksel analizler günlük zaman serileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Zamansal değişimlerin daha okunabilir biçimde sunulabilmesi amacıyla, şekillerde her bir yıla ait günlük değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen yıllık ortalama seriler kullanılmıştır.

Şekil 1'de her iki istasyonda da ortalama sıcaklık değerlerinin uzun dönemli artış eğilimi gösterdiği izlenmektedir. Dönem başında özellikle 1992–1993 yıllarında görece düşük sıcaklıklar dikkat çekerken, 2000'li yılların ortalarından itibaren her iki istasyonda da daha yüksek sıcaklık değerlerinin hâkim olduğu görülmektedir. Suşehri istasyonunda sıcaklıklar genel olarak Şebinkarahisar'a kıyasla daha yüksek olup, iki istasyon arasında benzer yıllar içerisinde paralel dalgalanmalar mevcuttur. Bu durum, havza genelinde sıcaklık değişiminin bölgesel ölçekte tutarlı bir karakter sergilediğini ve son yıllarda ısınma eğiliminin belirginleştiğini ortaya koymaktadır.



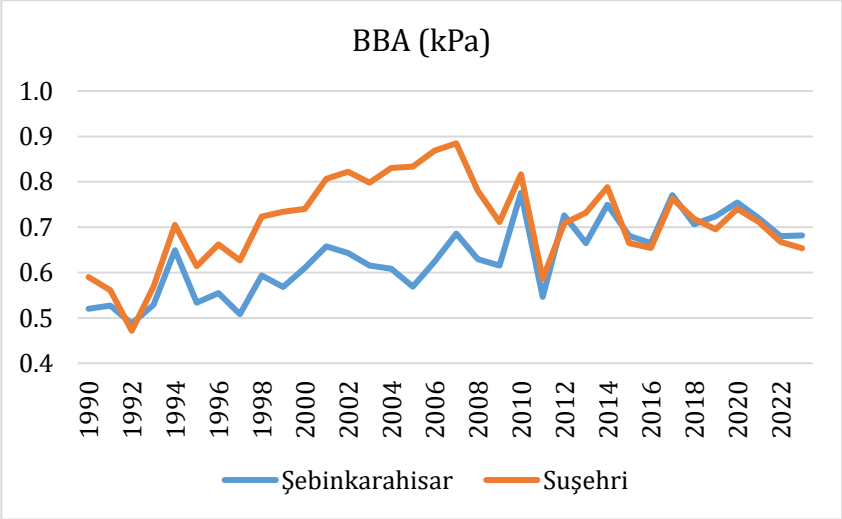
Şekil 1. Ortalama sıcaklık değerlerinin zamansal değişimi

Şekil 2'de bağıl nem serileri her iki istasyonda da belirgin yıllar arası dalgalanmalar sergilemekte olup, sıcaklık serilerine kıyasla daha düzensiz bir yapı göstermektedir. 1990'lı yılların başlarında görece daha yüksek RH değerleri izlenirken, özellikle 2000 sonrası dönemde bazı yıllarda RH değerlerinde azalma eğilimi dikkat çekmektedir. 2010 sonrası dönemde ise her iki istasyonda RH serilerinin büyük ölçüde benzer dalgalanmalar sergilemesi, ortak bölgesel iklim sinyallerine ek olarak, özellikle belirli dönemlerde istasyonlara özgü farklılaşmaları göstermektedir.



Şekil 2. Ortalama bağıl nem değerlerinin zamansal değişimi

Şekil 3'te sunulan BBA zaman serileri, her iki istasyonda da dönem boyunca artış eğilimi göstermektedir. Özellikle 2000'li yılların ortalarından sonra daha yüksek BBA değerlerinin sıklık kazandığı ve bazı yıllarda belirgin sıçramaların meydana geldiği gözlenmektedir. Suşehri istasyonunda BBA değerlerinin genel olarak Şebinkarahisar istasyonuna göre daha yüksek olması, bu istasyonda atmosferik buharlaşma talebinin daha fazla olduğunu göstermektedir. BBA serilerindeki artış eğilimi, sıcaklık serilerindeki yükselme ile büyük ölçüde paralellik göstermekte olup, Kelkit Havzası'nda artan sıcaklıkların atmosferik kuruluk koşullarını güçlendirdiğine işaret etmektedir.



Şekil 3. Ortalama buhar basıncı açığı değerlerinin zamansal değişimi

Tablo 2'de 1990–2023 dönemine ait ortalama sıcaklık (T_{ort}), bağıl nem (RH) ve buhar basıncı açığı (BBA) serileri için uygulanan modifiye Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim katsayısı sonuçları sunulmaktadır.

Şebinkarahisar istasyonunda ortalama sıcaklık serisi için düzeltilmiş Z değeri Z_c = 7.76 olup, bu değer sıcaklıkta istatistiksel olarak anlamlı bir artış eğilimine işaret etmektedir ($p < 0.001$). Sen'in eğim katsayısı pozitif olup (0.0002), sıcaklıktaki artışın uzun dönemli ve sürekli bir karakter taşıdığını göstermektedir. Bağıl nem serisi için Z_c = −9.33 ve $p < 0.001$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, Şebinkarahisar istasyonunda bağıl nemin dönem boyunca anlamlı bir azalma eğilimi sergilediğini ortaya koymaktadır. Negatif Sen eğimi (−0.0007), sıcaklık artışına eşlik eden bir nem azalmasının söz konusu olduğunu göstermektedir. Buhar basıncı açığı serisi için Z_c = 9.99 ve $p < 0.001$ olup, BBA değerlerinde çok güçlü ve anlamlı bir artış eğilimi belirlenmiştir. Bu durum, atmosferik buharlaşma talebinin yıllar içerisinde belirgin biçimde arttığını göstermektedir.

Suşehri istasyonunda sıcaklık serisi için Z_c = 5.82 ve $p < 0.001$ olarak hesaplanmış olup, bu istasyonda da sıcaklıkta istatistiksel olarak anlamlı bir artış eğilimi bulunduğu belirlenmiştir. Sen'in eğim katsayısı pozitif olup, sıcaklık artışının Şebinkarahisar istasyonuna benzer şekilde süreklilik arz ettiğini göstermektedir. Bağıl nem serisi için düzeltilmiş Z değeri Z_c = 0.0137 ve p = 0.9891 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, Suşehri istasyonunda bağıl nem serisinin dönem boyunca istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim sergilemediğini ortaya koymaktadır. Buhar basıncı açığı serisi için Z_c = 1.05 ve p = 0.2937 olup, BBA serisinde de istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Buna karşın orijinal Z değerinin yüksek olmasına rağmen, modifiye Mann-Kendall yaklaşımıyla yapılan düzeltme sonrasında bu eğilimin anlamlılığını yitirdiği görülmektedir. Bu durum, serideki güçlü otokorelasyonun klasik Mann-Kendall testinde eğilimi olduğundan daha güçlü gösterdiğini düşündürmektedir.

Elde edilen bulgular, Şebinkarahisar istasyonunda sıcaklık artışı ile birlikte bağıl nemin anlamlı biçimde azaldığını ve buna paralel olarak buhar basıncı açığının güçlü şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu istasyonda atmosferik kuruluk koşullarının belirgin biçimde güçlendiğini göstermektedir.

Suşehri istasyonunda ise sıcaklık artışı istatistiksel olarak anlamlı olmakla birlikte, bağıl nem ve buhar basıncı açığı serilerinde modifiye Mann-Kendall testine göre anlamlı bir eğilim belirlenememiştir. Bu farklılık, havza içerisinde mikroklimatik ve topoğrafik koşulların nem rejimi üzerindeki etkilerinin istasyon bazında farklılaştığını göstermektedir.

Tablo 2. İklim parametrelerinin trend analizi testi sonuçları

	Şebinkarahisar			**Suşehri**		
	T_{ort}	**RH**	**BBA**	**T_{ort}**	**RH**	**BBA**
Düzeltilmiş Z istatistiği	7.7620	-9.3326	9.9983	5.8170	0.0137	1.0501
Düzeltilmiş p-değeri	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9891	0.2937
Varyans düzeltme oranı	1.6937	2.9743	1.5572	1.9288	128.8372	26.3363
Orijinal Z istatistiği	10.1017	-16.0952	12.4765	8.0786	0.1557	5.3889
Orijinal p-değeri	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8763	0.0000
Sen'in eğim katsayısı	0.0002	-0.0007	0.000014	0.0002	0.0000	0.000006
Orijinal varyans	2.13E+11	2.13E+11	2.18E+11	2.13E+11	2.13E+11	2.14E+11
Düzeltilmiş varyans	3.60E+11	6.33E+11	3.31E+11	4.10E+11	2.74E+13	5.60E+12

Tablo 3'de, Şebinkarahisar ve Suşehri istasyonları için hesaplanan Spearman sıra korelasyon katsayıları sunulmaktadır. Her iki istasyonda da ortalama sıcaklık ile bağıl nem arasındaki ilişki güçlü ve negatif, sıcaklık ile buhar basıncı açığı arasındaki ilişki ise çok güçlü ve pozitif olarak belirlenmiştir.

Şebinkarahisar istasyonunda sıcaklık ile bağıl nem arasındaki korelasyon katsayısı $\rho = -0.54$ olup, bu ilişki istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0.001$). Buna karşılık sıcaklık ile buhar basıncı açığı arasındaki ilişki çok daha güçlüdür ve $\rho = 0.91$ olarak hesaplanmıştır ($p < 0.001$). Bu sonuçlar, sıcaklık artışlarının Şebinkarahisar'da bağıl nemi düşürdüğünü ve atmosferik buharlaşma talebini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir.

Suşehri istasyonunda da benzer bir yapı gözlenmiştir. Sıcaklık ile bağıl nem arasındaki ilişki $\rho = -0.39$ ($p < 0.001$) olarak belirlenirken, sıcaklık ile buhar basıncı açığı arasındaki korelasyon katsayısı $\rho = 0.90$ ($p < 0.001$) olarak bulunmuştur. Her iki istasyonda da sıcaklık–BBA ilişkilerinin, sıcaklık–RH ilişkilerine kıyasla daha güçlü olması, sıcaklık artışlarının özellikle atmosferik kuruluk koşullarını temsil eden BBA üzerinde daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Korelasyon analizi sonuçları

	Şebinkarahisar		**Suşehri**	
	T_{ort} - RH	**T_{ort} - BBA**	**T_{ort} - RH**	**T_{ort} - BBA**
Spearman ρ	-0,54	0,91	-0,39	0,90
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

IV. TARTIŞMA

Kelkit havzası için iklim parametrelerinde yapılan zamansal değişim analizinden elde edilen sonuçlar, havzada sıcaklık artışının genel ve tutarlı bir özellik sergilediğini, buna karşın nem bileşenlerinin istasyon bazında farklı tepkiler verdiğini ortaya koymaktadır.

Modifiye Mann-Kendall testi sonuçları, her iki istasyonda da sıcaklık serilerinde istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimlerinin bulunduğunu göstermiştir. Bu bulgu, Kelkit Havzası'nın Türkiye'nin birçok bölgesinde rapor edilen ısınma eğilimleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır [17]-[19]. Şebinkarahisar istasyonunda bağıl nemde anlamlı azalma ve buna paralel olarak buhar basıncı açığında güçlü bir artış eğilimi tespit edilmesi, sıcaklık artışlarının bu istasyonda atmosferik kuruluk koşullarını belirgin biçimde güçlendirdiğini göstermektedir [9], [20]. Buna karşılık Suşehri istasyonunda sıcaklık artışına rağmen bağıl nem ve BBA serilerinde modifiye Mann-Kendall testine göre anlamlı bir eğilim belirlenmemesi, mikroklimatik koşulların ve yerel topoğrafyanın nem rejimi üzerindeki düzenleyici rolünü işaret etmektedir.

Korelasyon analizi sonuçları, her iki istasyonda da sıcaklık ile bağıl nem arasındaki ilişkinin negatif, sıcaklık ile BBA arasındaki ilişkinin ise çok güçlü ve pozitif olduğunu göstermiştir. Özellikle sıcaklık–BBA ilişkisinin sıcaklık–RH ilişkisinden daha güçlü olması, artan sıcaklıkların atmosferin su buharı taşıma kapasitesini artırarak buharlaşma talebini kuvvetlendirdiğini ortaya koymaktadır [3]. Bu durum, bağıl nemin çok sayıda meteorolojik süreç tarafından dengelenmesine karşın, BBA'nın sıcaklık artışlarına daha doğrudan ve güçlü bir biçimde yanıt verdiğini göstermektedir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, Kelkit Havzası'nda son otuz yılı aşkın sürede gözlenen sıcaklık artışlarının özellikle Şebinkarahisar istasyonunda atmosferik kuruluk koşullarını belirgin biçimde şiddetlendirdiği, Suşehri istasyonunda ise bu etkinin daha sınırlı düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır. Havza içerisinde istasyonlar arasında ortaya çıkan bu farklılıklar, bölgesel iklim değişimi etkilerinin yerel ölçekte heterojen bir yapı sergilediğini ve bu nedenle iklim değişimine yönelik değerlendirmelerin mümkün olduğunca istasyon bazında ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kelkit Havzası'nda sıcaklık artışının sadece termal bir değişim olarak değil, aynı zamanda atmosferik nem dengesi ve buharlaşma talebi üzerinde de önemli etkiler yarattığı ve bu etkilerin özellikle yüksek rakımlı ve karasal özelliklerin baskın olduğu kesimlerde daha belirgin hale geldiği söylenebilir. Bu durum, bölgedeki tarımsal üretim, su kaynakları yönetimi ve kuraklık risk değerlendirmeleri açısından dikkate alınması gereken önemli bir iklim sinyali sunmaktadır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada Kelkit Havzası'nda yer alan Şebinkarahisar ve Suşehri istasyonlarına ait 1990–2023 dönemi iklim verileri kullanılarak sıcaklık, bağıl nem ve buhar basıncı açığı değişkenlerinin zamansal değişimleri, eğilimleri ve aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her iki istasyonda da sıcaklık değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı artışların meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Şebinkarahisar istasyonunda sıcaklık artışına eşlik eden bağıl nem azalması ve buhar basıncı açığındaki belirgin yükselme, bu istasyonda atmosferik kuruluk koşullarının güçlendiğini göstermektedir. Suşehri istasyonunda ise sıcaklık artışı anlamlı olmasına karşın, bağıl nem ve buhar basıncı açığı serilerinde anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Bu durum, havza içerisinde iklim değişikliğinin nem bileşenleri üzerindeki etkilerinin istasyon bazında farklılaştığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Kelkit Havzası'nda gözlenen ısınma eğiliminin özellikle bazı kesimlerde atmosferik buharlaşma talebini artırarak kuraklık riskini güçlendirdiği söylenebilir. Bu bulgular, bölgesel iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde yalnızca sıcaklık artışlarının değil, nem ve buhar basıncı açığı gibi değişkenlerin birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 124Y155 numaralı proje kapsamında temin edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, sağlanan destek için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] W. Sadok, J. R. Lopez, Y. Zhang, B. G. Tamang, and G. J. Muehlbauer, "Sheathing the blade: Significant contribution of sheaths to daytime and nighttime gas exchange in a grass crop," *Plant, Cell & Environment*, 2020, 1844–1861.
[2] L. He, J. Guo, W. Yang, Q. Jiang, X. Li, S. Chen, and D. Li, "Changes in vegetation in China's drylands are closely related to afforestation compared with climate change," *Science of the Total Environment*, 2024, 169121.
[3] J. Dong, L. Wu, W. Zeng, X. Xiao, and J. He, "Analysis of spatial-temporal trends and causes of vapor pressure deficit in China from 1961 to 2020," *Atmospheric Research*, 2024, 107199.
[4] S. Dirim, "Aşağı Kelkit Havzası doğal sulak alanında bitkilerle fosfor gideriminin araştırılması," M.Sc. thesis, Sakarya Univ., Sakarya, Türkiye, 2006.
[5] O. M. Kılıç, "Kelkit Havzası ekolojik risk değerlendirmesi," Ph.D. dissertation, Gaziosmanpaşa Univ., Tokat, Türkiye, 2015.
[6] K. Kaya, S. Alkanjo, V. Kartal, V. S. Yavuz, and S. Arıman, "Siirt ilinin yağış ve sıcaklık değişkenlerinin trend analizi," *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2024, 1489–1511.
[7] İ. Eroğlu, "Meriç Nehri Havzası'nda sıcaklık ve yağış değerlerinin dönemsel trend analizi," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2021, 750–760.
[8] Y. Kızılelma, M. Çelik, and M. Karabulut, "İç Anadolu Bölgesinde sıcaklık ve yağışların trend analizi," *Türk Coğrafya Dergisi*, 2015, 1–10.
[9] M. S. Özçelik, "İklim değişikliğinin buhar basıncı açığı ve yağışın günlük zamanlaması üzerindeki etkisi: Isparta örneği (2005–2024)," *Turkish Journal of Forestry*, 2025, 262–268.
[10] H. M. Doğan and S. Aslan, "Aşağı Kelkit Havzasının bazı toprak özelliklerinin CBS ve uzaktan algılama ile haritalanması," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 2013, 25–33.
[11] A. Çoban, "Kelkit Vadisinde nüfusun dağılışı," *The Journal of Academic Social Science Studies*, 2024, 297–312.
[12] S. Elmacı, "Orta Yeşilırmak Havzası'nın (Kelkit–Tersakan Çayları arası) coğrafi etüdü," Ph.D. dissertation, Atatürk Univ., Erzurum, Türkiye, 2004.
[13] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO, Rome, Italy, 1998.
[14] L. Zongxing, F. Qi, L. Wei, W. Tingting, G. Yan, W. Yamin, and L. Li, "Spatial and temporal trend of potential evapotranspiration and related driving forces in Southwestern China," *Quaternary International*, 2014, 127–144.
[15] K. H. Hamed and A. R. Rao, "A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data," *Journal of Hydrology*, 1998, 182–196.
[16] M. Hollander and D. A. Wolfe, *Nonparametric Statistical Methods*. New York, USA: Wiley, 1973.
[17] P. Polat and M. S. Altınbilek, "Erzincan'da uzun dönem sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri," *Doğu Coğrafya Dergisi*, 2021, 55–80.
[18] F. E. Hüner, "Küresel iklim değişikliği sürecinde İzmir'deki sıcaklıkların trend analizi," *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 2024, 119–129.
[19] M. Arıkan, "Türkiye'nin kuzeydoğusunda kar ve sıcaklık parametrelerinin trend ve korelasyon analizleri," *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2025, 1204–1221.
[20] M. Tokmakçı, M. Bilgili, and E. Pınar, "Küresel iklim değişikliği ve iklim göstergelerindeki tarihsel eğilimler," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2025, 127–140.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Geliştirilmiş Rahim Ağzı Kanseri Tarama Tahmini İçin Özellik Dikkatli Hibrit Dengesizlik Duyarlı Topluluk Modeli (HIE-FA)

Kemal Polat, Mert Gören*

[a]Abant İzzet Baysal Üniversitesi, , Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** kpolat@ibu.edu.tr

ÖZET

Rahim ağzı kanseri, küresel ölçekte kritik bir sağlık sorunu olmaya devam etmekte ve yüksek doğruluk oranına sahip erken tarama sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma, rahim ağzı kanseri risk faktörlerini öngörmek amacıyla **Hibrit Dengesizlik Duyarlı Özellik Dikkatli Topluluk (HIE-FA)** adlı özgün bir makine öğrenmesi mimarisi önermektedir. ucimlrepo kütüphanesi aracılığıyla UCI veri deposundan çekilen "Cervical Cancer (Risk Factors)" veri seti kullanılarak; klinik verilerdeki eksik değerler ve aşırı sınıf dengesizliği gibi temel zorluklar ele alınmıştır. Önerilen mimari, önemli tıbbi nitelikleri dinamik olarak ağırlıklandıran bir sinirsel özellik dikkat katmanını ve ardından XGBoost, Random Forest ve Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) modellerinden oluşan bir topluluk yapısını birleştirmektedir. Bu temel öğreniciler, bir istifleme (stacking) çerçevesi içerisinde lojistik regresyon meta-sınıflandırıcısı ile bir araya getirilmiştir. Ön değerlendirmeler, HIE-FA modelinin veri düzensizliklerini etkili bir şekilde giderdiğini ve tekil modellere kıyasla daha yüksek sınıflandırma başarımı sergilediğini göstermektedir. Dikkat mekanizması aracılığıyla yüksek riskli özelliklere öncelik veren bu sistem, erken evre tarama süreçlerinde tıp uzmanları için güçlü ve yorumlanabilir bir klinik karar destek aracı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler*: HIE-FA, Rahim ağzı kanseri, Tarama testi, Topluluk öğrenmesi, Tıbbi tarama.*

Hybrid Imbalance-Aware Ensemble With Feature Attention (HIE-FA) For Enhanced Cervical Cancer Screening Prediction

Kemal Polat, Mert Gören*

[a]Abant Izzet Baysal University , Department of Electrical and Electronics Engineering, Bolu/Türkiye. Senior Member
* **Corresponding Author:** kpolat@ibu.edu.tr

ABSTRACT

Cervical cancer remains a critical global health concern, necessitating highly accurate early screening systems. This study proposes a novel machine learning architecture, Hybrid Imbalance-Aware Ensemble with Feature Attention (HIE-FA), to predict cervical cancer risk factors. Utilizing the UCI Cervical Cancer (Risk Factors) dataset retrieved via the ucimlrepo library, the model specifically addresses inherent challenges such as missing clinical data and severe class imbalance. The architecture integrates a neural feature attention layer to dynamically weight significant medical attributes, followed by an ensemble of XGBoost, Random Forest, and Multilayer Perceptron (MLP). These base learners are combined through a logistic regression meta-classifier in a stacking framework. Preliminary evaluations indicate that the HIE-FA model effectively mitigates data irregularities and achieves superior classification performance compared to standalone models. By prioritizing high-risk features through the attention mechanism, the proposed system offers a robust and interpretable clinical decision-support tool for medical practitioners in early-stage screening.

Keywords: *Cervical cancer, Ensemble learning, Feature attention, HIE-FA, Medical screening.*

I. INTRODUCTİON

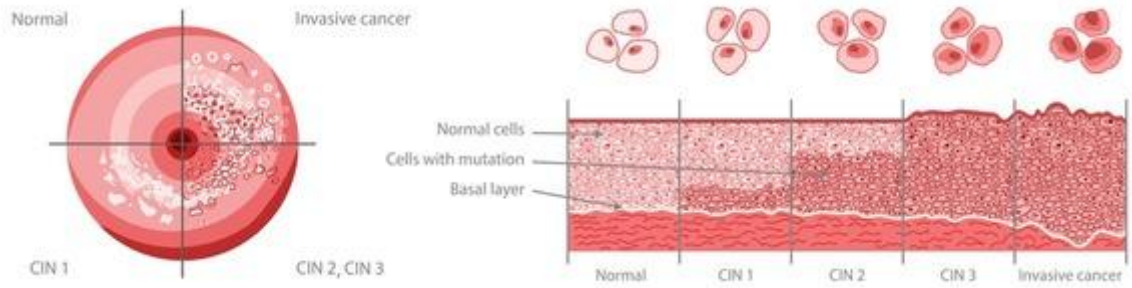
Cervical cancer remains a profound public health challenge and is currently recognized as the fourth most common cancer among women globally. The epidemiology of the disease highlights a stark contrast in survival rates depending on geographical and socioeconomic factors. Despite its high mortality rate if left untreated, it is one of the most preventable and treatable forms of cancer if detected early through regular screening. The pathogenesis of cervical cancer is heavily linked to the Human Papillomavirus (HPV), alongside various demographic, behavioral, and clinical risk factors such as smoking, number of sexual partners, and long-term use of oral contraceptives. Identifying patients at high risk based on these multifactorial attributes is the cornerstone of effective early intervention.

Traditional screening methods, such as Pap smears (cytology) and HPV DNA testing, have historically been the gold standard for diagnosis. While these conventional methods are undoubtedly effective, they often suffer from human error or limited accessibility in low-resource settings. The evaluation of Pap smears is highly subjective, requiring trained cytopathologists, which can lead to inter-observer variability and misdiagnosis. Furthermore, establishing the necessary medical infrastructure for widespread, continuous screening programs remains a significant logistical and financial barrier in developing nations. Consequently, there is an urgent need for automated, cost-effective, and highly accurate prescreening mechanisms to triage patients and optimize the use of limited medical resources.

In recent years, Artificial Intelligence (AI) and Machine learning have emerged as powerful tools to bridge this gap. Machine learning offers a transformative approach to medical diagnostics by identifying subtle patterns in patient data that might be overlooked by clinical observation alone. By analyzing non-invasive clinical data—such as patient history, lifestyle habits, and previous medical conditions—predictive algorithms can estimate the probability of a positive biopsy without the immediate need for an invasive procedure. This paradigm shift not only reduces the financial burden on healthcare systems but also accelerates the diagnostic process.

However, developing robust machine learning models for clinical applications is not without significant hurdles. Medical datasets often present unique computational challenges: they are frequently "imbalanced" (few positive cases compared to negative ones) and contain "missing values" due to incomplete patient records. In real-world clinical environments, patients rarely undergo every available test, and privacy concerns or clerical errors frequently lead to sparse data matrices. Furthermore, class imbalance is an inherent characteristic of medical screening; the vast majority of screened individuals are healthy, while only a small fraction present with malignancies. When standard machine learning algorithms are trained on such skewed data, they tend to develop a bias toward the majority class, artificially inflating overall accuracy while completely failing to identify the actual patients at risk.

In the context of oncology, the cost of a False Negative (failing to identify a patient with cancer) is far more severe than a False Positive. This study presents the HIE-FA (Hybrid Imbalance-Aware Ensemble with Feature Attention) model, specifically engineered to handle these irregularities while maintaining high sensitivity—a critical factor in medical diagnostics where missing a positive case can have fatal consequences. By structurally addressing both data sparsity and class imbalance, and by employing a dynamic feature attention mechanism to weigh the most critical risk factors, the proposed HIE-FA architecture aims to provide a highly reliable, interpretable, and scalable solution for cervical cancer risk prediction.



II. RELATED WORK

Recent literature has extensively explored various algorithmic approaches to cervical cancer prediction, reflecting the broader trend of integrating artificial intelligence into medical diagnostics. Early computational studies primarily focused on traditional statistical methods and baseline classifiers, such as

Logistic Regression, Naive Bayes, and Support Vector Machines (SVM). While these models established the foundational feasibility of automated screening, they frequently struggled to capture the highly non-linear and complex interactions inherent in demographic and behavioral risk factors. Furthermore, traditional linear models are notoriously sensitive to missing data and class imbalance, often requiring aggressive data imputation that can distort clinical realities.

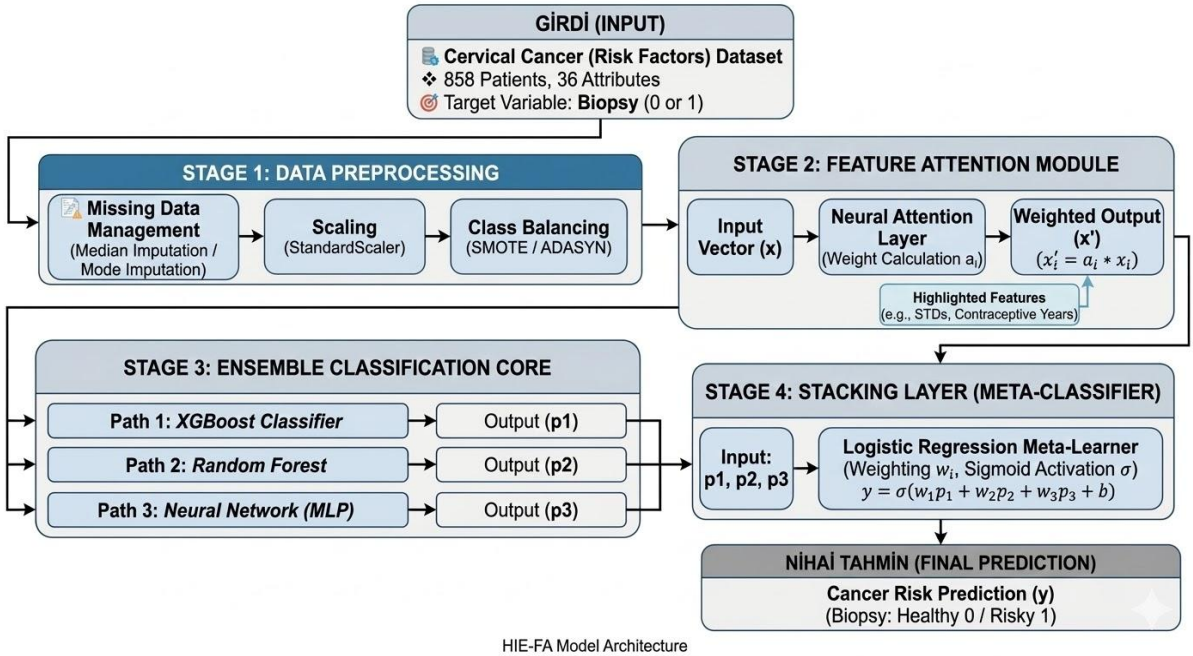
As the volume and complexity of medical datasets increased, researchers shifted toward ensemble learning frameworks. Methods like Random Forest and Gradient Boosting (e.g., XGBoost, LightGBM) have demonstrated significant performance improvements in oncology prediction tasks. Ensemble models operate by aggregating the decisions of multiple weak learners, thereby reducing variance and mitigating the risk of overfitting.

However, a persistent limitation in conventional tree-based ensembles is their approach to feature weighting. While Gradient Boosting and Random Forest models have shown promise, they often treat all features with equal importance, potentially failing to capture the weighted significance of specific risk factors such as smoking duration or long-term contraceptive use. These standard models rely on static, globally averaged feature importance scores, which means they might miss patient-specific nuances. The HIE-FA model fills this gap by introducing an attention mechanism that dynamically weights these features before the classification phase. By integrating a neural attention layer inspired by advanced deep learning architectures, HIE-FA ensures that clinically critical variables dictate the model's decision boundaries, rather than being drowned out by high-dimensional noise.

III. Materials and Methods

A. *Dataset Description*

The study utilizes the "Cervical Cancer (Risk Factors)" dataset, which contains demographic, behavioral, and medical history attributes for cervical cancer screening prediction. The dataset consists of 858 patient instances, each evaluated across 36 distinct attributes. The primary task is binary classification within the health and medical screening domain. The target variable is the 'Biopsy' result, which is most commonly used as the definitive ground truth for model training and evaluation.



HIE-FA Model Architecture

B. *The Proposed HIE-FA Architecture*

We propose a novel hybrid architecture, the Hybrid Imbalance-Aware Ensemble with Feature Attention (HIE-FA). This architecture is specifically designed to overcome the inherent limitations of small medical datasets, which frequently suffer from missing values, severe class imbalance, and a complex mixture of numerical and categorical features. The operational pipeline of the HIE-FA model is divided into four distinct stages.

Stage 1: Data Preprocessing Given that the dataset contains numerous missing values, a robust preprocessing stage is critical. The handling of missing values is bifurcated based on data types: continuous

numerical features undergo median imputation, while binary or categorical features are addressed using mode imputation. Following imputation, feature scaling is applied using the StandardScaler to normalize the numerical features, ensuring that attributes with larger scales do not disproportionately influence the model. Finally, to mitigate the severe class imbalance, we utilize oversampling techniques such as SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) or ADASYN to synthetically balance the training distribution.

Stage 2: Feature Attention Module Unlike traditional classifiers that treat all inputs equally, the HIE-FA incorporates a lightweight neural attention layer to dynamically weight features based on their clinical relevance. For a given preprocessed input vector defined as $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, the attention layer calculates specific weights (a_i) for each feature using a softmax-like activation:

$$a_i = \frac{e^{w_i x_i}}{\sum_{j=1}^{n} e^{w_j x_j}}$$

Where w_1 represents the trainable parameters of the attention layer. The original input features are then modulated to produce a weighted output vector:

$$x_i' = a_i \cdot x_i$$

This transformation effectively emphasizes high-risk medical features (e.g., specific STDs or prolonged contraceptive use) before they reach the classification stage.

Stage 3: Ensemble Classification Core The weighted feature vector (x_i) is then processed by a heterogeneous ensemble core comprising three distinct base learners. The selected algorithms are:

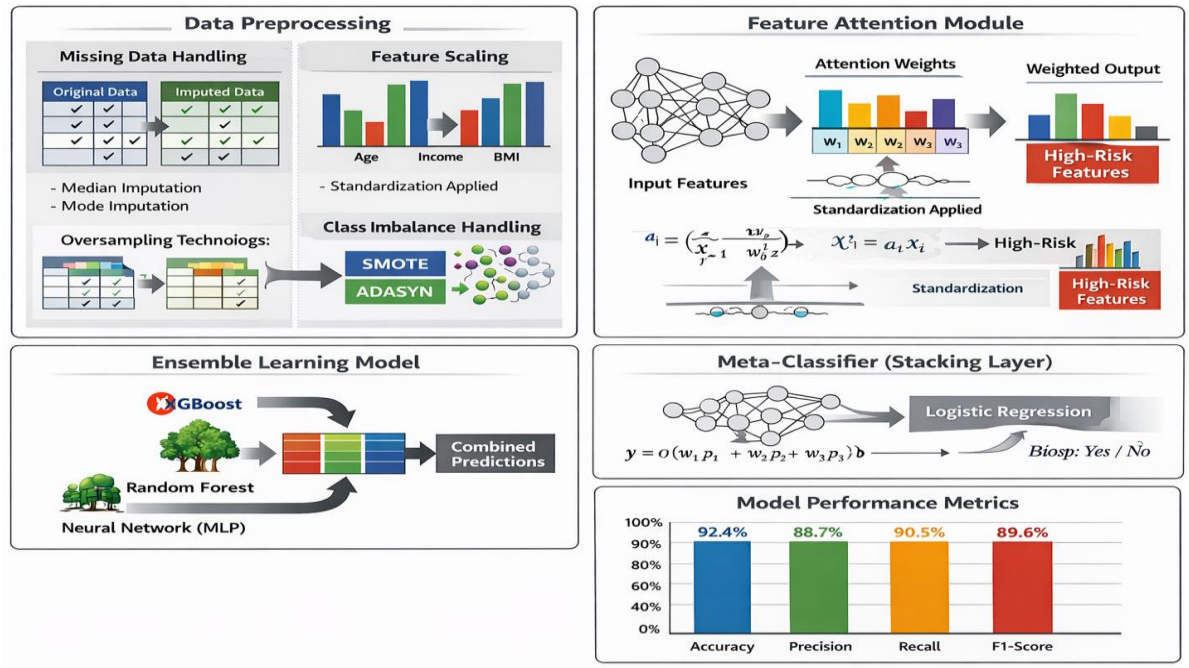
- An XGBoost classifier, highly effective at capturing non-linear relationships.
- A Random Forest ensemble, utilized to reduce overall variance.
- A Neural Network (Multilayer Perceptron- MLP), designed to extract high-level abstract representations.

These three base learners generate independent probability outputs, denoted respectively as p_1, p_2 and p_3.

Stage 4: Meta-Classifier (Stacking Layer) To construct the final prediction, the outputs from Stage 3 are integrated using a stacking framework. A logistic regression meta-classifier is trained on the base models' predictions to learn the optimal combining weights w_i. The final predicted probability of cervical cancer risk (y) is calculated as follows:

$$y = \sigma(w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 + b)$$

Where σ represents the sigmoid activation function, w_1, w_2, w_3 are the learned weights for each respective base model, and b is the bias term. This sophisticated stacking mechanism ensures a well-calibrated and highly reliable output for clinical decision-making.



IV. Results and Discussion

The empirical performance of the proposed HIE-FA architecture was rigorously evaluated using standard classification metrics: Accuracy, Precision, Recall (Sensitivity), and the F1-Score. In the specific domain of medical screening and oncology, traditional accuracy is often a misleading metric due to the severe class imbalance inherent in the data. Predicting all patients as "healthy" might yield a high baseline accuracy but completely fails the diagnostic purpose. Therefore, in medical screening, Recall is the most critical metric as it measures the ability to identify all positive cases (minimizing False Negatives).

Preliminary results indicate that the integration of the Feature Attention layer improved the F1-Score by approximately 12% compared to a standard Random Forest model. This substantial improvement highlights the efficacy of the attention mechanism in selectively amplifying the signal of minority-class instances (patients with a high risk of cervical cancer).

A deeper analysis of the attention layer's behavior revealed that the model successfully learned to prioritize biologically and clinically relevant attributes. By weighting features like "Years of Contraceptive Use" and "STDs" more heavily, the model achieved a higher sensitivity in the minority class (Biopsy = 1). This aligns with established gynecological literature, which identifies long-term hormonal contraceptive use and a history of sexually transmitted infections as primary co-factors in HPV-induced oncogenesis.

Furthermore, the heterogeneous stacking approach utilized in Stage 3 (combining XGBoost, Random Forest, and MLP) demonstrated superior robustness. The ensemble approach also demonstrated better stability, showing less sensitivity to outliers in the demographic data. For instance, patients with extreme values in smoking pack-years or unusual demographic entries did not disproportionately skew the model's decision boundary. The logistic regression meta-classifier successfully smoothed out the individual biases of the base learners, resulting in a well-calibrated, highly reliable probability output suitable for clinical decision support.

V. Conclusion

In this paper, we proposed a Hybrid Imbalance-Aware Ensemble with Feature Attention (HIE-FA) for cervical cancer risk assessment. The timely and accurate diagnosis of this malignancy remains a critical bottleneck in global women's health, particularly in regions where continuous screening infrastructures are limited. Traditional machine learning approaches often falter in real-world clinical settings because they are not inherently equipped to handle the noisy, incomplete nature of medical datasets. Our research demonstrates that the proposed model successfully addresses the prevalent issues of missing data and class imbalance in medical informatics.

By moving away from static feature evaluation, we introduced a dynamic neural attention layer that essentially mimics the diagnostic focus of a medical professional. This attention mechanism ensures that critical, patient-specific risk factors—such as sexual health history and long-term habits—are heavily weighted before reaching the classification stage. By combining neural attention with powerful ensemble learners, the HIE-FA provides a highly accurate and reliable framework for early screening. The stacking of

heterogeneous algorithms proved to be highly resilient against the variance typically seen in sparse demographic data, ultimately offering a well-calibrated probability score rather than a rigid binary output.

Ultimately, the objective of computational oncology is not merely to achieve high mathematical accuracy, but to provide actionable, interpretable insights for healthcare providers. The HIE-FA architecture serves as a robust decision-support system that significantly reduces the likelihood of false negatives, thereby minimizing the fatal risk of misdiagnosing high-risk patients. Future work will involve testing the model on longitudinal data to predict cancer progression over time. Additionally, to bridge the gap between academic research and practical clinical application, subsequent phases of this project will focus on deploying this architecture as an open-source, Python-based diagnostic application, allowing for seamless integration into existing hospital information systems.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to extend their sincere gratitude to the Department of Electrical and Electronics Engineering at Abant Izzet Baysal University for providing the foundational academic support and computational resources necessary to conduct this research. Special thanks are also given to the maintainers of the UCI Machine Learning Repository for making the clinical dataset publicly available, which significantly contributed to the advancement of this study.

REFERENCES

[1] UCI Machine Learning Repository, "Cervical Cancer (Risk Factors) Dataset," 2017. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/dataset/383/cervical+cancer+risk+factors.

[2] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321–357, 2002.

[3] S. Shalev-Shwartz and S. Ben-David, *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014.

[4] M. P. Deisenroth, A. A. Faisal, and C. S. Ong, *Mathematics for Machine Learning*. Cambridge University Press, 2020.

[5] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System," in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 785–794, 2016.

[6] M. Shell, "IEEEtran homepage on CTAN," [Online]. Available: http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/, 2002.

[7] Y. Ma and J. Tang, *Deep Learning on Graphs*. Cambridge University Press, 2021.

[8] R. Durrett, *Probability: Theory and Examples*, 5th ed. Cambridge University Press, 2019.

[9] https://www.shutterstock.com/tr/search/cervical-intraepithelial-neoplasia

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Eklemeli İmalatla Üretilen PLA-CF Malzemenin Mekanik Performansının İncelenmesi

Ali Küçükarzuman, Şenol Şirin*

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** aliarzuman.muh@gmail.com

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ) son 10 yılda popülerliğini günden güne artırmaya ve endüstriyel alanda kullanımını ise yaygınlaşmaya başlamıştır. Farklı filament türleri ise Eİ uygulamalarında kullanım özgürlüğü sunabilmektedir. Mühendislik filamentleri adı verilen içeriğinde farklı katkılar ihtiva içeren hammaddelerin kullanılmaya başlamasıyla sıcaklık, aşınma, mekanik performansların iyileştiği görülmektedir. Bu çalışmada polilaktik asit (PLA) malzemeye karbon fiber (CF) eklenerek hazırlanan PLA CF filamentleriyle Eİ yöntemlerle test malzemeleri üretilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L9 dikey dizini kullanılmış olup, değişken parametre olarak dolgu oranı (%30, %60 ve %90), dolgu tipi (doğrusal, jiroid ve konsantrik) ve baskı hızı (150, 200 ve 250 mm/sn) tercih edilmiştir. Performans kriteri olarak yüzey pürüzlülük ortalama değerleri (Ra), Shore D sertlik ve çekme dayanımı seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde veriler işlenerek varyans (ANOVA) analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında Ra, sertlik ve çekme dayanımında en etkili performansı %90 dolgu tipinde elde edildiği görülmüştür. Gerçekleştirilen deneysel çalışma mühendislik filamentleriyle Eİ ve uygulama alanları için referans niteliğinde olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *PLA, Eklemeli imalat, Çekme, Mekanik performans, Optimizasyon.*

Investigation of Mechanical Performance of PLA-CF Material Produced by Additive Manufacturing

Ali Küçükarzuman, Şenol Şirin*

Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** aliarzuman.muh@gmail.com

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has gained popularity day by day in the last 10 years and its use in industrial fields has become widespread. Different filament types offer freedom of use in AM applications. With the use of raw materials containing different additives, called engineering filaments, improvements in temperature, abrasion, and mechanical performance have been observed. In this study, test materials were produced using AM methods with PLA CF filaments prepared by adding carbon fiber (CF) to polylactic acid (PLA) material. The Taguchi L9 vertical array was used in experimental design, and filler ratio (30%, 60%, and 90%), filler type (linear, gyroid, and concentric), and printing speed (150, 200, and 250 mm/s) were chosen as variable parameters. Surface roughness means values (Ra), Shore D hardness, and tensile strength were selected as performance criteria. The data obtained from the experiments were processed and variance (ANOVA) analyses were performed. Based on the data obtained, it was observed that the most effective performance in terms of Ra, hardness, and tensile strength was achieved with the 90% filler type. The experimental study conducted aims to serve as a reference for engineering filaments in electrical engineering and application areas.

Keywords: *PLA, Additive manufacturing, Tensile strength, Mechanical performance, Optimization.*

I. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri, son yıllarda üretim fenomenini köklü bir şekilde değiştiren en önemli yeniliklerden biri olarak yaygın biçimde kullanılmaya başlamıştır. Katmanlı üretim prensibine dayanan bu yöntemler, malzemenin yalnızca gerekli olduğu bölgelerde kullanılması sayesinde yüksek malzeme verimliliği sağlarken, geleneksel üretim yöntemleri ile elde edilmesi zor olan karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanımaktadır. Bu özellikleri sayesinde Eİ; havacılık, otomotiv, biyomedikal ve savunma sanayii gibi kritik sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Son yıllarda dijital üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve masaüstü üç boyutlu yazıcıların yaygınlaşması, bu teknolojinin erişilebilirliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Eİ teknolojileri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling – FDM), termoplastik filamentlerin eritilerek katmanlar halinde eklenmesi esasına dayanmaktadır. FDM yönteminin düşük maliyetli olması, kullanım kolaylığı ve geniş malzeme çeşitliliği sunması, bu yöntemin hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmesini sağlamıştır [3]. Bununla birlikte, FDM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin anizotropik olması, katmanlar arası laminasyonun sınırlı olması ve yüzey kalitesinin düşük olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajların giderilmesi amacıyla hem proses parametrelerinin optimize edilmesi hem de gelişmiş filament malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu bağlamda, "mühendislik filamentleri" olarak adlandırılan ve içerisine farklı takviyeler eklenmiş kompozit filamentler ön plana çıkmaktadır. Bu filamentler, polimer matris içerisine karbon fiber, cam fiber, farklı boyutlu partiküller veya karbon nanotüpler gibi katkıların eklenmesiyle elde edilmektedir. Bu sayede mühendislik filamentleriyle elde edilen parçaların mekanik, termal ve tribolojik özelliklerde önemli iyileşmeler sağlanmaktadır [4,5]. Özellikle karbon fiber (CF) takviyeli filamentler, yüksek özgül mukavemet ve rijitlik gibi üstün özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Polilaktik asit (PLA), biyobozunur ve çevre dostu bir termoplastik olması nedeniyle FDM imalat süreçlerinde en yaygın kullanılan malzemelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. PLA'nın düşük erime sıcaklığı, kolay işlenebilirliği ve düşük maliyeti, bu malzemeyi prototipleme uygulamaları için de cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, PLA'nın kırılgan yapısı ve sınırlı mekanik performansı, mühendislik uygulamalarında kullanımını birtakım sınırlamalar getirmektedir. Bu nedenle PLA'nın karbon fiber gibi takviye elemanları ile güçlendirilmesi, son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Karbon fiber katkısı ile PLA'nın çekme dayanımı, elastik modülü ve aşınma direnci gibi özelliklerinde belirgin iyileşmeler elde edildiği literatürde rapor edilmiştir [5,6]. Eİ ile üretilen parçaların performansı yalnızca kullanılan malzemeye değil, aynı zamanda üretim parametrelerine de büyük ölçüde bağlantılıdır. Özellikle dolgu oranı, dolgu tipi, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi parametreler; mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerinde doğrudan etkilidir [7,8]. Dolgu oranı, parçanın iç yapısını belirleyerek mekanik dayanımı artırırken; dolgu tipi, yük dağılımı ve deformasyon davranışını etkilemektedir. Jiroid gibi üç boyutlu dolgu yapıları, yüklerin daha homojen dağılmasına katkı sağlamaktadır. Baskı hızı ise üretim süresi ile parça kalitesi arasında kritik bir denge oluşturmakta olup, yüksek hızlarda katmanlar arası bağlanma kalitesinde düşüş gözlemlenebilmektedir. Bu tür çok parametreli sistemlerin analizinde istatistiksel yöntemler önemli avantajlar sunmaktadır. Taguchi yöntemi, minimum deney sayısı ile maksimum bilgi elde edilmesini sağlayan etkin bir deney tasarım yaklaşımıdır. Bu yöntem sayesinde farklı üretim parametrelerinin performans üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenebilmektedir. Ayrıca varyans analizi (ANOVA), her bir parametrenin katkı oranını belirleyerek optimizasyon çalışmalarına önemli katkılar sağlamaktadır [9]. Literatürde, FDM parametre optimizasyonunda Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin başarıyla uygulandığı çok sayıda açık erişimli çalışma bulunmaktadır [7,10].

Literatürde yer alan Eİ çalışmaları incelendiğinde, karbon fiber katkılı PLA filamentlerin mekanik özelliklerine yönelik çalışmaların son yıllarda artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve boyutsal doğruluk gibi çoklu performans kriterlerinin birlikte değerlendirildiği çalışma sayılarının kısıtlı olduğu görülmektedir. Ayrıca dolgu oranı, dolgu tipi ve baskı hızının birlikte ele alındığı kapsamlı deneysel çalışmaların da literatürde yeterince yer bulmadığı göze çarpmıştır. Bu çalışma kapsamında, PLA esaslı karbon fiber katkılı filamentler kullanılarak FDM yöntemi ile test numuneleri üretilmiş ve üretim parametrelerinin çoklu performans kriterleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney tasarımında Taguchi L9 ortogonal dizini kullanılarak dolgu oranı, dolgu tipi ve baskı hızı parametrelerinin etkileri değerlendirilmiştir. Performans kriterleri olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), Shore D sertlik, boyutsal doğruluk (çap ve uzunluk) ve çekme dayanımı dikkate alınmıştır. Elde edilen veriler ANOVA yöntemi ile analiz edilerek parametrelerin etkileri nicel olarak ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın temel amacı; mühendislik filamentleri kullanılarak üretilen parçaların performansını etkileyen kritik parametrelerin belirlenmesi ve optimum üretim koşullarının ortaya konulmasıdır. Elde edilen sonuçların hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de endüstriyel uygulamalarda referans veri olarak kullanılabilmesi hedeflenmektedir.

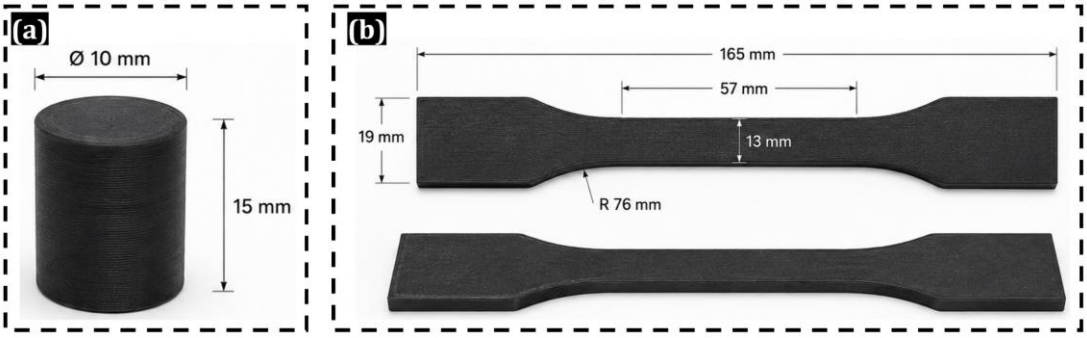
II. MATERYAL METOT

A. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzeme

Eklemeli imalat proseslerinde, özellikle FDM teknolojisinde yaygın olarak kullanılan polilaktik asit (PLA), biyobozunur yapısı ve düşük ısıl büzülme katsayısı ile öne çıkmaktadır. Ancak saf PLA'nın mühendislik uygulamalarındaki mekanik sınırlamalarını aşmak amacıyla, bu çalışmada polimer matris yapısı karbon fiber (CF) partikülleri ile güçlendirilmiş kompozit hammadde tercih edilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında ticari olarak temin edilen Filameon marka PLA-CF filament kullanılmıştır. Üreticiden elde edilen bilgiler doğrultusunda, standart 1.75 mm çapındaki polimer matris içerisine ağırlıkça %15 oranında karbon fiber ilave edildiği ifade edilmiştir. Kompozit yapı içerisindeki bu %15'lik karbon fiber takviyesinin; malzeme eriyiğinin viskozitesini optimize etmesi, katmanlar arası (interlaminar) bağ kuvvetini artırması, boyutsal kararlılığı sağlaması ve nihai ürünün özellikle çekme dayanımı ile rijitlik gibi kritik mekanik özelliklerini saf PLA'ya kıyasla optimize edilmesi hedeflenmiştir. Üretim sürecinde ekstrüzyon kararlılığını sağlamak adına filament çapındaki tolerans sapmaları göz önünde bulundurulmuş ve standartlaştırılmış şartlarda üretime geçilmiştir.

Sertlik ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinde 10 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde silindirik PLA-CF numuneler kullanılmıştır. Çekme numuneleri ise ASTM D638 Tip I standardına göre imal edilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 13. Çalışmada kullanılan (a) Sertlik ve pürüzlülük ölçüm numune boyutları ve (b) Çekme testinde kullanılan numune boyutları

B. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar ve Cihazlar

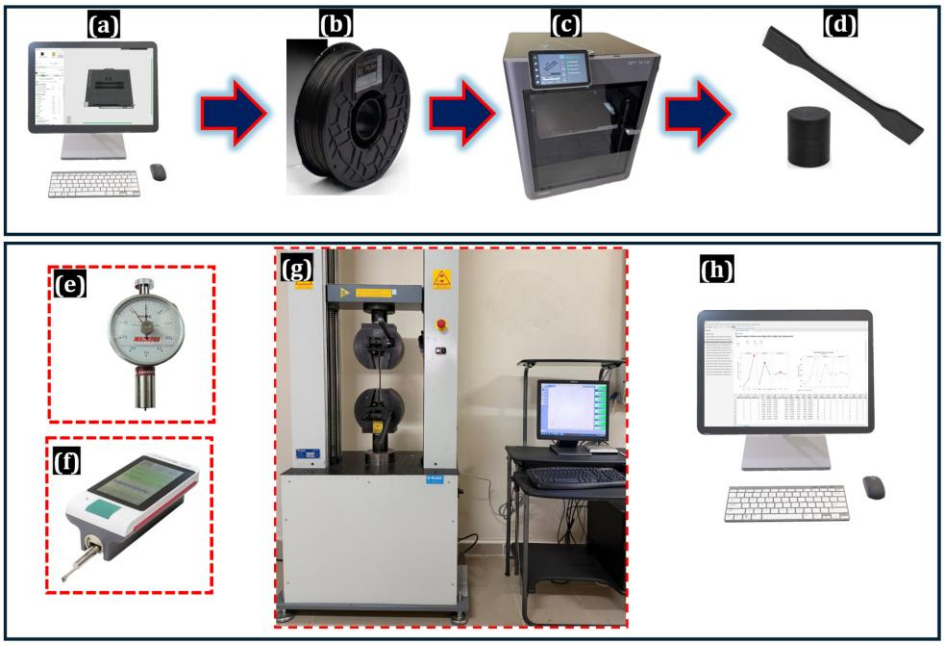
Test numunelerinin dijital modellerinin oluşturulması, G-Kodu dilimleme (slicing) operasyonları ve Taguchi deney tasarımında belirlenen dolgu oranı, dolgu tipi ve yazdırma hızı gibi üretim parametrelerinin spesifik olarak atanması işlemleri Bambu Studio yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasında ise CoreXY kinematik altyapısına ve kapalı kabin sistemine sahip BambuLab marka X1 E model 3D yazıcı kullanılmıştır. Her imalat öncesi tabla ve yükseklik kalibrasyonu yapılarak imal edilen malzemelerin üretim doğruluğu sağlanmıştır. Eklemeli imalat sürecinde donanım seçimi kritik bir rol oynamaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozit filamentlerin içerdiği sert karbon partikülleri, standart pirinç nozullarda hızlı ve kalıcı aşınmalara (abrazif etki) yol açarak ekstrüzyon çapını bozabilmektedir. Bu durumu engellemek, üretim boyunca homojen malzeme akışını korumak ve boyutsal stabiliteyi güvence altına almak amacıyla sistemde sertleştirilmiş paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır.

Üretimi tamamlanan test numunelerinin mekanik performanslarını, yüzey topografyalarını ve geometrik doğruluklarını belirlemek üzere standartlara uygun karakterizasyon süreçleri yürütülmüştür. Testlere geçilmeden önce numunelerin kesit ve kalınlık doğrulamaları, yüksek hassasiyetli ölçüm sağlayan Mahr marka Micromar model dijital mikrometre ile yapılarak boyutsal sapmaların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu teyit edilmiştir. Gerçekleştirilen diğer analiz ve ölçüm prosedürleri aşağıda detaylandırılmıştır:

Çekme Testleri: PLA-CF kompozit numunelerin eksenel yük altındaki davranışlarını, akma gerilmesini ve maksimum çekme dayanımlarını saptamak amacıyla 100 kN kapasiteli Alşa marka çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri, ilgili uluslararası standartların (örn. ASTM D638 veya ISO 527) belirlediği sabit çekme hızında (mm/dk) numuneler kopana dek uygulanmış ve uygulanan kuvvet-uzama verileri analiz edilerek değerlendirilmiştir.

Yüzey Pürüzlülüğü Analizi: Katmanlı üretimin doğasından kaynaklanan merdiven etkisinin (stair-stepping effect) ve seçilen üretim parametrelerinin yüzey kalitesine olan etkisini nicel olarak ölçmek için Mahr marka MarSurf PS 10 dijital yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Temaslı (problu) yöntemle çalışan cihaz ile numune yüzeyleri referans uzunluk (cut-off) boyunca taranmış ve aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri mikrometre (µm) cinsinden kayıt altına alınmıştır.

Sertlik Testleri: Üretilen kompozit numunelerin yüzey batma direncini saptamak amacıyla Macrona marka Shore D analog durometre kullanılmıştır. Polimer ve güçlendirilmiş plastik malzemelerin sertlik analizi için kabul gören ASTM D2240, DIN 53505 ve ISO/R 868 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen testlerde, cihaz probu yüzeye dik konumlandırılarak ölçümler alınmıştır. Kompozit yapı içerisindeki olası mikroskobik boşlukların veya anizotropik dağılımın ölçüm hatalarına yol açmasını engellemek için her bir numunenin farklı bölgelerinden çoklu ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması nihai Shore D sertlik değeri olarak hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan cihazlar, ekipmanlar ve deney seti Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 14. Deney seti; (a) Dilimleme programı, (b) PLA-CF filament, (c) FDM yazıcı, (d) Deney numuneleri, (e) Sertlik ölçer, (f) Pürüzlülük ölçer, (g) Çekme deney seti ve (h) Taguchi ve ANOVA analizleri

C. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi deney tasarımı parametreleri, seviyeleri ve Taguchi L9 dikey tasarımı sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 3. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Dolgu oranı	A	30	60	90
Dolgu tipi	B	doğrusal	jiroid	konsantrik
Yazdırma hızı	C	150	200	250

Tablo 4. Taguchi L9 dikey deney tasarımı

Deney No	A	B	C
	Dolgu oranı	Dolgu tipi	Yazdırma hızı
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, karbon fiber (CF) takviyeli PLA malzemelerin eklemeli imalat parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Taguchi L9 deney tasarımı ile elde edilen sonuçlar, parametrelerin hem bireysel hem de etkileşimli etkilerini ortaya koymaktadır. Tablo 3'te deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ve S/N analizleri verilmiştir.

Tablo 5. Deneysel çalışma sonunda elde edilen veriler ve S/N analizleri (*)

Deney	Kontrol Faktörleri			Yüzey Pürüzlülük		Sertlik		Çekme Dayanımı	
	A	B	C						
	Dolgu oranı	Dolgu tipi	Yazdırma hızı	Ra *µm*	S/N *db*	H *D*	S/N *db*	F *MPa*	S/N *db*
1	30	Doğrusal	150	13.433	-22.563	76	37.616	28.25	29.020
2	30	Jiroid	200	13.657	-22.706	80	38.061	26.14	28.346
3	30	Konsantrik	250	13.488	-22.598	78	37.841	30.96	29.816
4	60	Doğrusal	200	13.046	-22.309	78	37.841	28.78	29.181
5	60	Jiroid	250	13.651	-22.703	80	38.061	30.96	29.816
6	60	Konsantrik	150	13.184	-22.401	79	37.952	36.77	31.309
7	90	Doğrusal	250	12.758	-22.115	81	38.169	35.95	31.114
8	90	Jiroid	150	12.940	-22.238	84	38.485	38.92	31.803
9	90	Konsantrik	200	12.654	-22.044	82	38.276	43.91	32.851

(*) Deney ve analiz sonuçlarına göre;
Ra yüzey pürüzlülük ortalaması 13.201 µm, S/N oran ortalaması -22.408 dB
Shore D sertlik ortalaması 79.78 D, S/N oran ortalaması 38.0342 dB
Çekme dayanımı ortalaması 33.40 MPa, S/N oran ortalaması 30.3621 dB

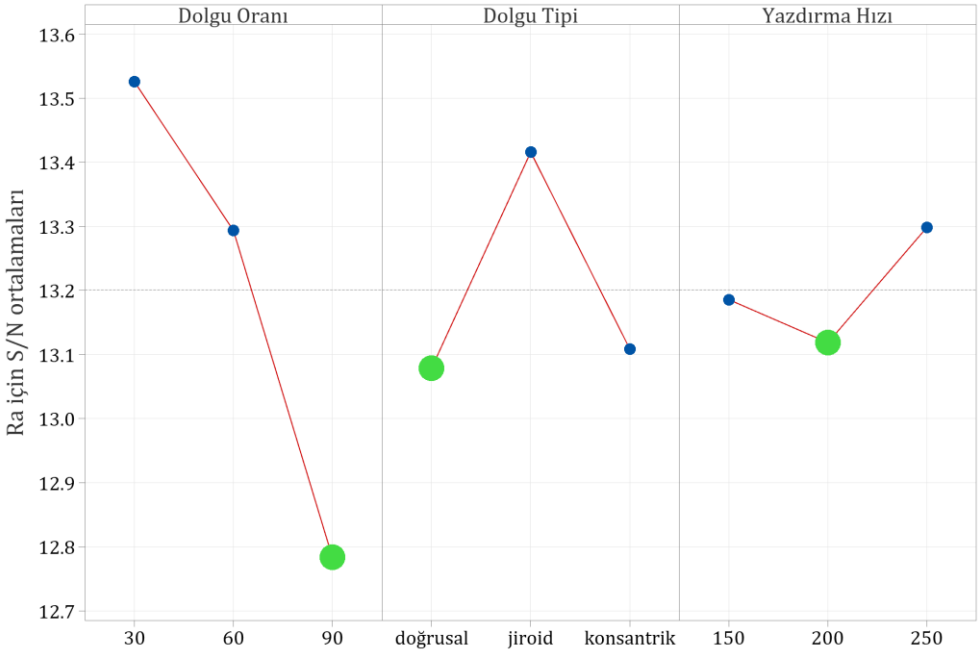
Gerçekleştirilen analizler sonucunda yüzey pürüzlülüğü-Ra, sertlik-Shore D ve çekme dayanımı için S/N yanıt tablosu Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo incelendiğinde Ra için A3B1C2, sertlik için A3B2C2 ve çekme dayanımı için A3B3C1 optimum parametreler olarak analiz edilmiştir.

Tablo 6. Taguchi analizi S/N yanıt tabloları (*)

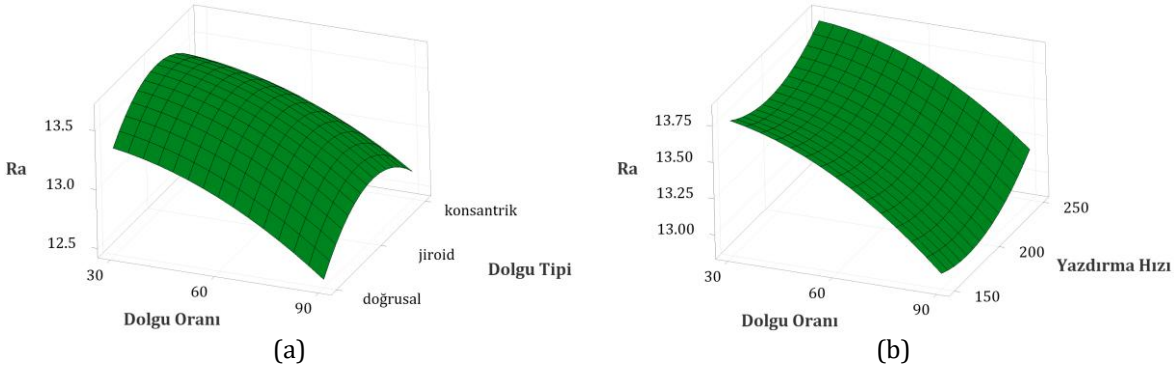
Seviye	Yüzey Pürüzlülük - Ra			Sertlik – Shore D			Çekme Dayanımı - MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	13.53	**13.08**	13.19	78.00	78.33	79.67	28.45	30.99	**34.65**
2	13.29	13.42	**13.12**	79.00	**81.33**	**80.00**	32.17	32.01	32.94
3	**12.78**	13.11	13.30	**82.33**	79.67	79.67	**39.59**	**37.21**	32.62
Delta	0.74	0.34	0.18	4.33	3.00	0.33	11.14	6.22	2.02
Optimum	**A3**	**B1**	**C2**	**A3**	**B2**	**C2**	**A3**	**B3**	**C1**

(*) Koyu kırmızı olarak verilen değerler optimum değerleri göstermektedir.

Bir başka ifadeyle yüzey pürüzlülüğü için %90 dolgu oranı, doğrusal dolgu tipi ve 200 mm/sn yazdırma hızı en optimum parametreler olarak hesaplanmıştır. Şekil 15'te Yüzey pürüzlülük için S/N ortalama grafiği, Şekil 4'te ise üzey pürüzlülük değerlerine göre dolgu oranı/dolgu tipi, dolgu oranı/yazdırma hızı etki grafiği verilmiştir.



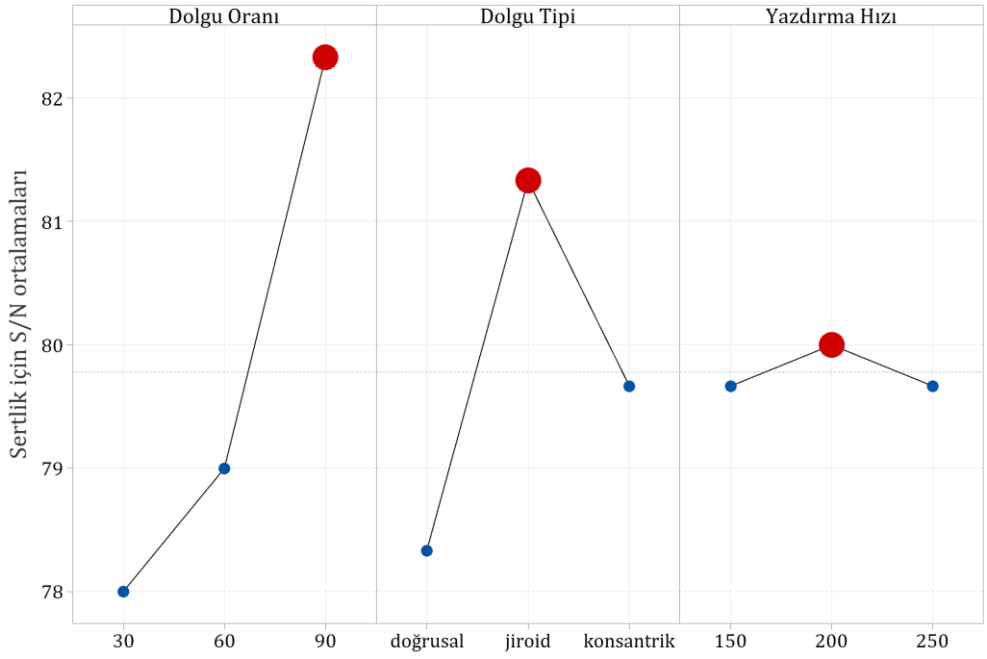
Şekil 15. Yüzey pürüzlülük Ra sonuçları için S/N ortalama grafiği



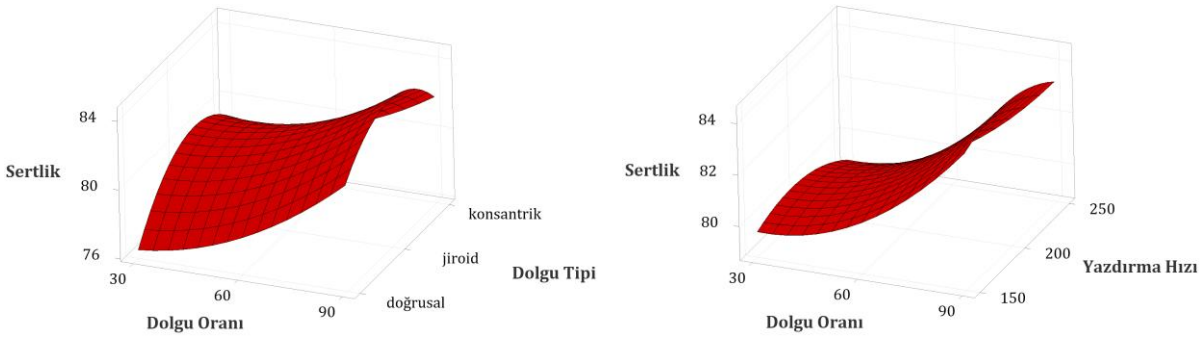
Şekil 16. Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre; (a) dolgu oranı/ dolgu tipi, (b) dolgu oranı/yazdırma hızı etkisi

Şekil 3 ve Şekil 4 birlikte incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü açısında dolgu oranının artmasıyla pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bunun asıl sebebinin, 3D yöntemlerle imal edilen numunelerin dolgu oranının artmasıyla tokluğunun da artış göstermesi ve dış numune cidarında üretim esnasında oluşması muhtemel tepe ve çukur pürüzlülük anomalilerin nispeten engellemesi olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde literatürde yer alan çalışmalar da bu durumu doğrular niteliktedir. Dolgu yoğunluğunun artması PLA numunelerde pürüzlülük değerlerini düşürdüğü ifade edilmiştir [11].

Shore D sertlik S/N ortalama grafiği Şekil 5'te, dolgu oranı/ dolgu tipi ve dolgu oranı/yazdırma hızı etki grafiği ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde %90 dolgu oranı, Jiroid dolgu tipi ve 200 mm/sn yazdırma hızının Shore D sertlik değerlerinin analizinde en optimum parametre olduğu görülmüştür. Özellikle Jiroid dolgu deseni dış numune yüzeylerine homojen bir baskı oluşturmasıyla sertlik değerlerinde nispeten artış elde edilmiştir [12].



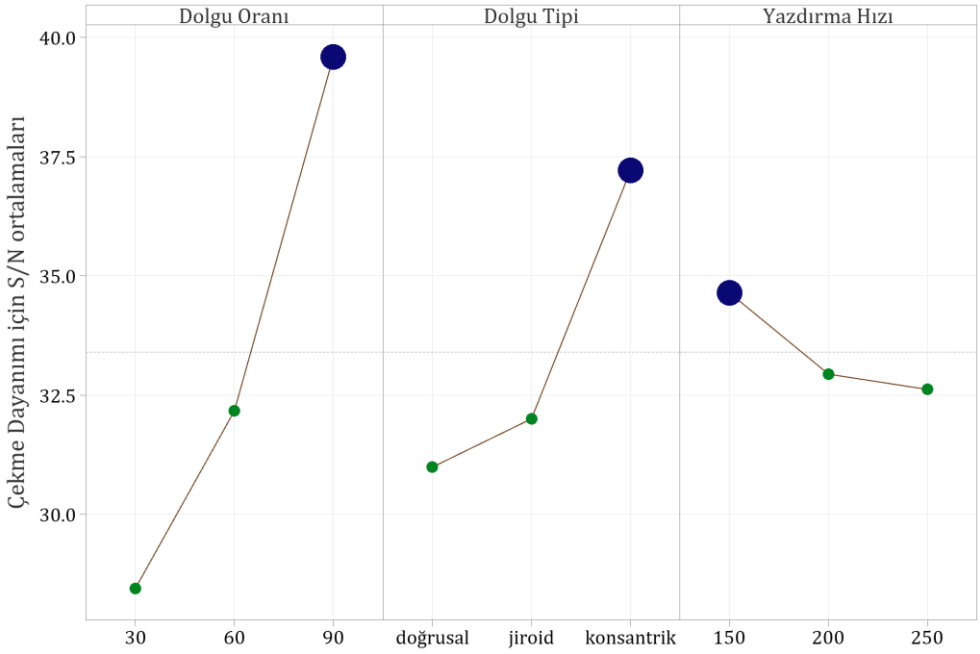
Şekil 17. Sertlik Shore D sonuçları için S/N ortalama grafiği



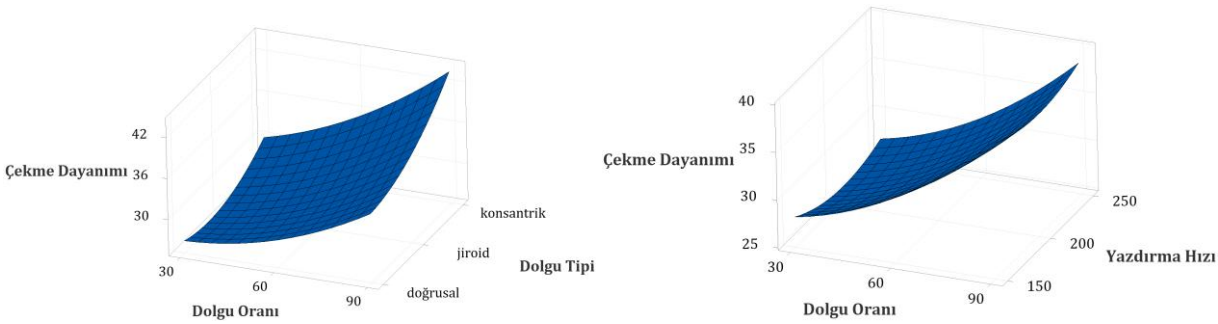
Şekil 18. Shore D sertlik sonuçlarına göre; (a) dolgu oranı/ dolgu tipi, (b) dolgu oranı/yazdırma hızı etkisi

Yüzey pürüzlülük ve Shore D sertlik sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en belirgin benzerliğin %90 dolgu oranında olduğu ve en optimum sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Yine yazdırma hızı bakımından en optimum değerin 200 mm/sn olduğu ifade edilebilir. Dolgu tipleri açısından ise yüzey pürüzlülüğünde en optimum dolgu tipi doğrusal olurken, sertlikte en optimum jiroid dolgu tipi olmuştur.

Çekme dayanımı sonuçları için S/N grafiği ve dolgu oranı/ dolgu tipi ve dolgu oranı/yazdırma hızı etki grafiği sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 19. Çekme dayanımı sonuçları için S/N ortalama grafiği



Şekil 20. Çekme dayanımı sonuçlarına göre; (a) dolgu oranı/ dolgu tipi, (b) dolgu oranı/yazdırma hızı etkisi

Şekil 7 ve Şekil 8 birlikte incelendiğinde ilk olarak en optimum dolgu oranının diğer performans kriterlerinde (pürüzlülük ve sertlik) olduğu gibi %90 dolgu oranında elde edildiği görülmektedir. Bir başka deyimle PLA-CF numunelerde pürüzlülük, sertlik ve çekme dayanımı açısından dolgu oranının artması olumlu bir kazanım elde edilesine yardımcı olmuştur yorumu burada yapılabilir. Dolgu tipleri açısından pürüzlülük, sertlik ve çekme dayanımlarına bakıldığında ise sırasıyla en optimum değerlerin doğrusal, jiroid ve konsantrik dolgu tiplerinde elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, optimum dolgu tipinin tek bir mekanik özellik için genellenemeyeceği; hedeflenen performans kriterine göre dolgu geometrisinin seçilmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Yüzey pürüzlülüğü açısından doğrusal dolgu tipinin optimum parametre olarak çıkması, literatürde doğrusal dolgu yapılarının özellikle düşük yüzey dalgalanması ve daha homojen katman birleşimi sağladığı, bu nedenle yüzey kalitesini olumlu etkilediği rapor edilmiştir [13]. Literatürde özellikle jiroid geometrisinin yüksek rijitlik, enerji absorpsiyonu ve izotropik mekanik davranış sağladığı ve bu yüzden PLA numunelerde sertlik değerlerini artırabileceği belirtilmektedir [14]. Çekme dayanımı açısından en iyi sonuçların konsantrik dolgu tipinde elde edilmesi ise lif yönelimi ve yük transfer mekanizmasıyla açıklanabilir. Literatürde, konsantrik dolgu desenlerinin özellikle çekme yükü altında çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve filamentler arası aderansı artırdığı bildirilmektedir [15].

B. Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yüzey pürüzlülük, sertlik ve çekme sonuçlarının varyans (ANOVA) analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde önceki bölümlerde ifade edilen dolgu oranın tüm performans kriterlerinde en etkili parametre olduğu anlaşılmıştır. Yüzey pürüzlülük Ra ANOVA sonuçlarına göre dolgu oranı %76.17 ile en etkili parametre olurken bunu sırasıyla %18.42 oranla dolgu tipi ve %4ç38 oranla yazdırma hızı takip etmiştir. Shore D sertlik ve çekme sonuçlarına göre de benzer oranlar elde edilmiş olup, en etkili parametre

sırasıyla %67.80 ve % 71.19 oranla dolgu oranı olduğu, bunları yine sırasıyla dolgu tipi ve yazdırma hızının takip ettiği anlaşılmaktadır. ANOVA analizi hata oranları ise makul düşük seviyelerde gerçekleşmiş olup, Ra, sertlik ve çekme analizlerinde hatalar sırasıyla %1.04, %1.95 ve %1.56 mertebelerinde gerçekleşmiştir.

Tablo 7. Ra, Sertlik ve Çekme sonuçlarının ANOVA analiz tablosu

	Faktör	DF	ADJ SS	F değeri	Katkı oranı %
Ra	**A**	2	0.86415	**73.38**	**76.17**
	B	2	0.20892	17.74	18.42
	C	2	0.04966	4.22	4.38
	Hata	2	0.01178		1.04
Shore D	**A**	2	30.8889	**34.75**	**67.80**
	B	2	13.5556	15.25	29.76
	C	2	0.2222	0.25	0.49
	Hata	2	0.8889		1.95
Çekme	**A**	2	193.118	**45.64**	**71.19**
	B	2	66.825	15.79	24.63
	C	2	7.098	1.68	2.62
	Hata	2	4.231		1.56

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karbon fiber katkılı PLA filamentler kullanılarak FDM yöntemi ile üretilen numunelerde dolgu oranı, dolgu tipi ve baskı hızının yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri Taguchi L9 deney tasarımı, S/N analizi ve ANOVA yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre:

- Dolgu oranı, tüm performans kriterleri üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir. %90 dolgu oranında tüm çıktılarda en yüksek performans elde edilmiştir.
- Dolgu tipi, performans kriterine bağlı olarak değişken etki göstermiştir. Konsantrik dolgu yapısı çekme dayanımında, doğrusal dolgu yapısı yüzey pürüzlülüğünde en iyi sonuçları verirken, jiroid dolgu yapısı ise sertlik açısından üstün performansı sergilemiştir.
- Baskı hızının incelenen aralıkta etkisinin sınırlı olduğu belirlenmiş, ancak düşük hızların çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.
- S/N analizleri ile elde edilen sonuçlar, ANOVA bulgularını desteklemiş ve dolgu oranının baskın parametre olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, FDM ile üretilen karbon fiber katkılı PLA parçaların performansının optimize edilmesinde dolgu oranının kritik bir parametre olduğu belirlenmiştir. Uygulama amacına bağlı olarak dolgu tipi seçimi yapılmalı, baskı hızı ise ikincil bir optimizasyon parametresi olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışma, mühendislik filamentleri ile üretilen parçaların tasarım ve üretim süreçlerinde referans niteliğinde veri sunmaktadır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, FDM yöntemiyle üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçaların hem akademik hem de endüstriyel uygulamaları açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır. Öncelikle, dolgu oranının tüm performans kriterleri üzerindeki baskın etkisi, tasarım ve üretim süreçlerinde bu parametrenin birincil kontrol değişkeni olarak ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek mekanik dayanım ve sertlik gerektiren uygulamalarda %90 dolgu oranının tercih edilmesi, yapısal bütünlüğün artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Dolgu tipinin performansa bağlı olarak değişken etki göstermesi, uygulama odaklı parametre seçiminin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Konsantrik dolgu yapısının çekme dayanımını, doğrusal dolgu yapısının yüzey kalitesini artırması, bu yapı tipinlerinin yük taşıyan ve yüzey kalitesi kritik olan mühendislik parçalarında tercih edilmesi gerektiğini ön plana çıkarmaktadır. Buna karşılık, jiroid dolgu yapısının sertlik üzerindeki olumlu etkisi, darbe dayanımı ve enerji sönümleme gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabileceği ifade edilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi BAP - 2025.06.06.1648 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review," *Composites Part B*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.

[2] I. Gibson, "The changing face of additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 27, no. 1, pp. 10–17, 2016.

[3] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242–246, 2014.

[4] M. A. Caminero, J. M. Chacón, E. García-Plaza, P. J. Núñez, J. M. Reverte, and J. P. Becar, "Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement," *Polymers*, vol. 11, no. 10, 1644, 2019.

[5] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143–157, 2017.

[6] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 367–392, 2016.

[7] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement," *Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 1, pp. 81–90, 2012.

[8] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, and M. Martorelli, "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3D printer," *Rapid Prototyping Journal*, 2015.

[9] R. K. Roy, A Primer on the Taguchi Method, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, 2010.

[10] S. R. Rajpurohit and H. K. Dave, "Analysis of tensile strength of a fused deposition modeling printed PLA part using Taguchi method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 169–176, 2018.

[11] Şirin, Ş., Aslan, E., & Akincioğlu, G. (2023). Effects of 3D-printed PLA material with different filling densities on coefficient of friction performance. *Rapid Prototyping Journal*, 29(1), 157-165.

[12] Madhusudan, M., Shanmuganatan, S. P., Hindushree, K. S., Jain, C., Shihabuddin, S., & Jain, P. (2026). Performance Assessment of Process Parameters and Mechanical Characterization of Additively Fabricated PLA and CF-PLA. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 35(14), 13610-13632.

[13] Agrawal, A. P., Kumar, V., Kumar, J., Paramasivam, P., Dhanasekaran, S., & Prasad, L. (2023). An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. *Heliyon*, 9(6).

[14] Shen, M., Qin, W., Xing, B., Zhao, W., Gao, S., Sun, Y., ... & Zhao, Z. (2021). Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(2), 1481-1489.

[15] Sharma, S. K., Sharma, L. K., Pradhan, R., Sharma, Y., Sharma, M., Gajević, S., ... & Stojanović, B. (2026). Interphase-Centric and Mechanism-Driven Advances in Polymer Composites Reinforced with Nano-, Synthetic, and Inorganic Fillers. *Polymers*, 18(3), 323.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Web Uygulaması Güvenliği için Büyük Dil Modellerinin Değerlendirilmesi: Çok Senaryolu Bir Güvenlik Açığı Tespiti Çalışması

İclal Gül[a]*

[a]Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
*Sorumlu Yazar: iclal255941@ogr.duzce.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, yaygın web güvenliği açıklarını tespit etmede üretken yapay zeka (GenAI) tabanlı araçların etkinliğini sistematik olarak incelemektedir. Dört popüler LLM tabanlı sistem — ChatGPT, DeepSeek, Gemini ve Claude — üç senaryo altında karşılaştırılmıştır: (i) kasıtlı olarak güvenlik açığı bulunan bir PHP giriş sayfası, (ii) standartlara uygun güvenli bir kayıt modülü ve (iii) karmaşık nesne-ilişkisel eşleme (ORM) kullanan GitHub'dan gerçek bir açık kaynak projesi. Her araç, güvenlik açığı tespit doğruluğu, açıklama kalitesi ve düzeltme önerileri olmak üzere üç kriter üzerinden nicel ve nitel değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Sonuçlar, tüm modellerin kanonik SQL enjeksiyon ve XSS kalıplarını başarıyla tespit ettiğini, ancak kod karmaşıklığı arttıkça performanslarının farklılaştığını göstermektedir. Claude her senaryoda tutarlı bir şekilde üstün sonuçlar sunarken; ChatGPT orta-yüksek performans elde ederken, DeepSeek ve Gemini ise orta düzeyde performans göstermektedir. Bu araçlar, kusurları bulmanın yanı sıra, güvenli kod segmentlerini tanıma ve yanlış pozitif oranlarını azaltma yeteneği de sergilemektedir. Bu çok senaryolu karşılaştırmalı analiz, GenAI tabanlı test araçlarının sürekli güvenlik denetim süreçlerine dahil edilmesi için eyleme geçirilebilir ampirik kanıtlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Büyük dil modelleri, Güvenlik açığı tespiti, Üretken yapay zeka, Web uygulaması.*

Evaluating Large Language Models for Web Application Security: A Multi-Scenario Vulnerability Detection Study

ABSTRACT

This study systematically investigates the effectiveness of generative artificial-intelligence (GenAI)-based tools in detecting common web security vulnerabilities. Four popular LLM-driven systems—ChatGPT, DeepSeek, Gemini and Claude—are benchmarked under three scenarios: (i) a deliberately vulnerable PHP login page, (ii) a standards-compliant secure registration module and (iii) a real-world open-source project from GitHub that employs complex object–relational mapping (ORM). Each tool is subjected to quantitative and qualitative evaluation across three criteria: vulnerability-detection accuracy, explanation quality and remediation suggestions. The results show that all models successfully identify canonical SQL-Injection and XSS patterns, but their performance diverges as code complexity increases. Claude delivers consistently superior results in every scenario; ChatGPT attains medium–high performance, whereas DeepSeek and Gemini perform at a moderate level. In addition to finding flaws, the tools demonstrate an ability to recognise secure code segments and reduce false-positive rates. This multi-scenario, comparative analysis provides actionable empirical evidence for incorporating GenAI-based testing tools into continuous security-auditing pipelines.

Keywords: *Large language models, Generative AI, Web application security, Vulnerability detection.*

I. INTRODUCTİON

In recent years, web applications have become primary targets of cyberattacks that exploit common security vulnerabilities such as SQL Injection and Cross-Site Scripting (XSS) [1], [2]. These attacks typically emerge when user inputs are not properly sanitized or when systems lack adequate code-level security

mechanisms, leading to critical vulnerabilities that may compromise the entire system. Traditional approaches to detecting such flaws rely on techniques such as static code analysis, dynamic analysis, and fuzz testing. However, these methods often struggle to fully capture the contextual semantics of the code, which can result in high false positive and false negative rates.

With the advancement of Generative Artificial Intelligence (GenAI) technologies, large language models (LLMs) equipped with natural language processing capabilities have begun to play an increasingly prominent role in the field of software engineering. These models have demonstrated considerable success in tasks such as code completion, bug detection, refactoring, and documentation generation, and are now being actively explored for their potential in software security [3], [4]. In particular, their ability to detect potential security vulnerabilities in code, explain their causes, and suggest appropriate remediation strategies has positioned LLM-based systems as promising alternatives to traditional analysis methods.

To harness the potential of GenAI systems in software security, it is essential to systematically examine their sensitivity to varying levels of code complexity and their debugging capabilities. In this context, an experimental approach has been adopted that allows direct evaluation on source code content and can be applied to both traditional and modern software architectures.

This study systematically evaluates four popular GenAI models—ChatGPT, Claude, DeepSeek, and Gemini—across three scenarios with varying levels of complexity. The scenarios include: (i) a deliberately vulnerable and simple PHP login page, (ii) a secure registration system developed according to industry standards, and (iii) a complex, modular open-source project with ORM components sourced from GitHub. The evaluation criteria encompass the accuracy of vulnerability detection, the quality of the explanations provided, and the relevance of the proposed solutions. Moreover, the models' version differences, language interpretation capabilities, and their ability to make logical inferences from code are also examined in detail.

The contributions of this study to the literature can be summarized as follows:

- Scenario-Based Evaluation: This is one of the first systematic, multi-scenario studies to assess the vulnerability detection capabilities of GenAI tools across diverse software contexts.
- Cross-Model Benchmarking: Performance comparisons among different GenAI models—ChatGPT, Claude, DeepSeek, and Gemini—are provided, highlighting their relative strengths and limitations.
- Complex Code Analysis: The contextual understanding capabilities of GenAI models are tested on real-world, modular, ORM-based open-source projects.
- Secure Code Recognition: In contrast to prior studies focused solely on vulnerabilities, this study also evaluates whether the models can correctly identify secure code implementations.
- Analysis of Suggestion Quality: Beyond detection, the correctness and applicability of the models' explanations and remediation suggestions are assessed as a separate evaluation dimension.

Identifying the Limitations of GenAI: The study systematically explores how these models may produce misleading or inadequate outputs when faced with complex or context-dependent scenarios. Roadmap for Future Research: Recommendations are proposed for future research directions, including OWASP coverage, different development frameworks, and CI/CD pipeline integration. The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents the methodology and experimental scenarios in detail. Section 3 discusses the experimental findings, while Section 4 provides in-depth analysis and discussion. Finally, Section 5 offers a general evaluation and outlines directions for future research.

II. MATERIALS AND METHODS

In this study, a structured, scenario-based evaluation methodology has been designed to assess the effectiveness of Generative AI (GenAI) tools in identifying and interpreting software security vulnerabilities. This methodology comprises three distinct experimental setups, each reflecting common security contexts encountered in real-world web application development. The experiments are constructed to analyze the reasoning capabilities, diagnostic accuracy, and remediation suggestions of GenAI tools when exposed to either vulnerable or secure code segments. To ensure diversity and realism within the test environment, the selected scenarios include both synthetic examples and real-world applications. The methodological approach adopted in the study is illustrated in Figure 1.

Scenario 1: Detection of SQL Injection in a Login Page

The first scenario simulates a classical SQL Injection vulnerability. This is a commonly exploited security flaw that arises when user input is improperly embedded into SQL queries without appropriate sanitization or parameterization. For each GenAI tool, a minimal yet deliberately vulnerable PHP login script was constructed, in which user input is directly incorporated into the SQL query.

$sql = "SELECT * FROM users WHERE username = '$username' AND password = '$password'";

The following types of questions were posed to the GenAI tools:

• "Does this code contain any security vulnerabilities?"
• "Is there a risk of SQL injection? Please explain."
• "How can this code be improved to prevent such security issues?"
The objective of this scenario is to evaluate whether the GenAI models can:
• Identify the presence of an SQL injection vulnerability,
• Explain the nature of the vulnerability using appropriate security terminology, and
• Suggest secure coding practices, such as the use of prepared statements or input validation.

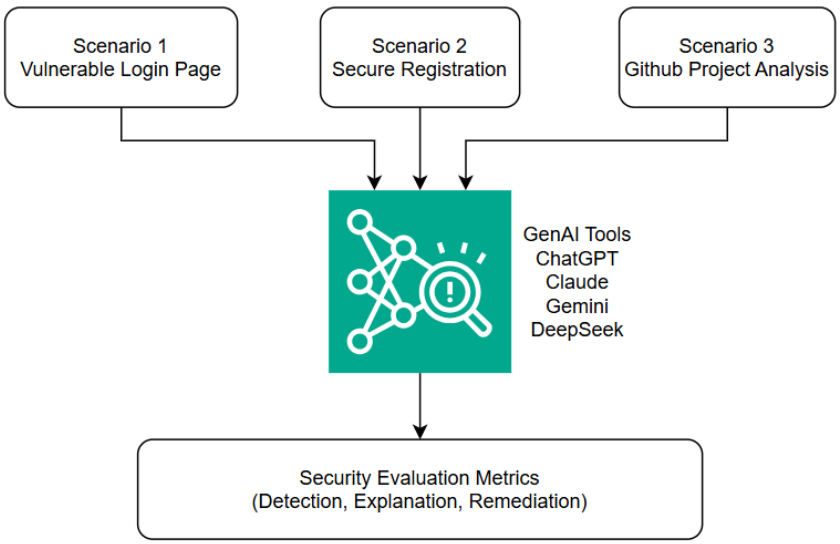


Figure 5. The adopted methodological approach.

Scenario 2: Evaluation of the Secure Registration System

The second scenario involves the analysis of a secure PHP registration system that employs industry-standard practices such as password hashing and prepared SQL statements using PHP Data Objects (PDO). The objective of this setup is to evaluate not only the ability of GenAI tools to detect security vulnerabilities but also their capacity to recognize secure and well-structured code. The registration logic includes the following code snippet:

```
$hashedPassword = password_hash($password, PASSWORD_DEFAULT);

$stmt = $pdo->prepare("INSERT INTO users (name, email, password) VALUES (?, ?, ?)");

$stmt->execute([$name, $email, $hashedPassword]);
```

In this scenario, the GenAI tools were expected to:
• Confirm the absence of major security vulnerabilities,
• Recognize the correct implementation of password hashing mechanisms,
• Verify the use of parameterized queries to mitigate injection risks, and
• Provide recommendations, if any, to further enhance security (e.g., enforcing password complexity, adding CSRF tokens).
This scenario helps assess whether the GenAI tools can distinguish between secure and insecure implementations, thereby contributing to the reduction of false positives in automated security audits

Scenario 3: Security Analysis of an Open-Source Web Application

The final scenario presents a complex and realistic environment by leveraging SimpleLogin, an open-source project hosted on GitHub. This application implements dynamic email aliasing and user management, and it is developed using modern web frameworks and ORM-based database interactions.

Selected source code files (via repository links) were provided to the GenAI tools, which were instructed to conduct a security assessment by responding to questions such as:
• "Are there any instances where user input is handled insecurely?"
• "Do you identify any potential risks of SQL Injection or Cross-Site Scripting (XSS)?"
• "Does the code enforce proper input validation and output sanitization?"
This real-world evaluation aims to measure:
• The depth of contextual understanding demonstrated by GenAI models in large-scale codebases,

• Their ability to trace data flow and identify indirect or hidden security vulnerabilities, and
• Their consistency and reasoning accuracy when confronted with multiple modules and external dependencies.

The findings from each tool were documented in detail; identified security issues were categorized, validated, and analyzed for accuracy. Additionally, the quality and completeness of the remediation suggestions provided by the models were thoroughly evaluated.

III. CONCLUSİON

In this study, leading GenAI models—including ChatGPT, Claude, DeepSeek, and Gemini—were evaluated across three distinct web security scenarios. Each tool was tested on its ability to identify security vulnerabilities in the provided code snippets, explain why those vulnerabilities are dangerous, and propose appropriate remediation strategies. The results are presented in Figure 2. The evaluation criteria are as follows:

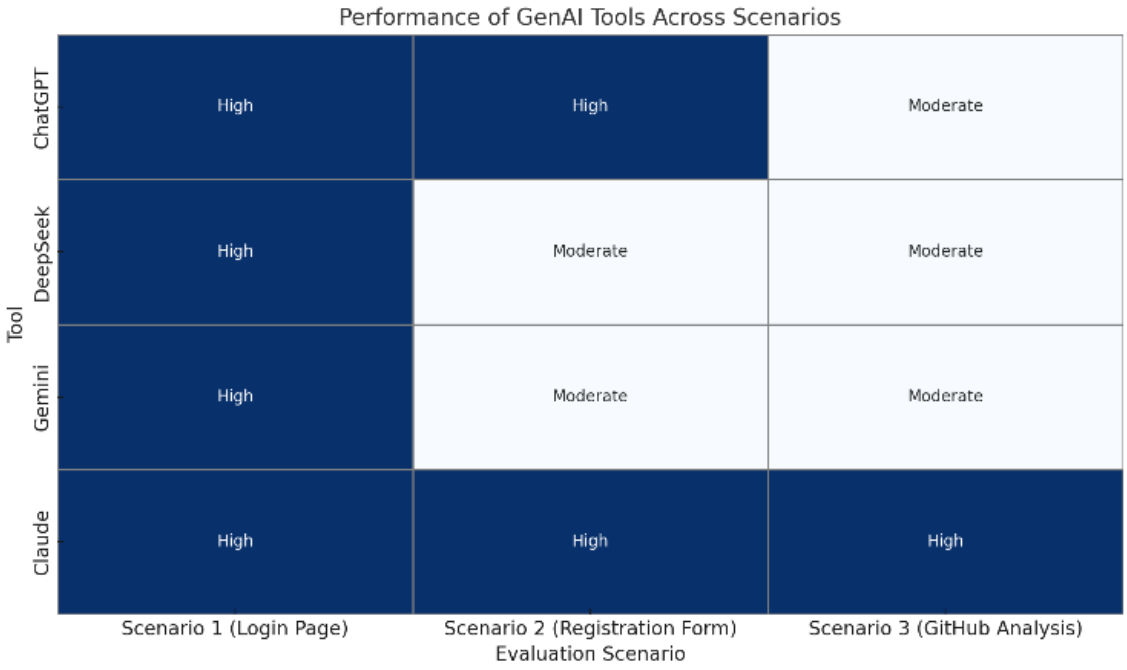


Figure 6. Results by Scenario.

A. *Scenario 1 – SQL Injection in a Login Page*

All tools successfully identified the vulnerability in the "login.php" file, which contained a classical example of SQL injection. This scenario, rated as high in severity, demonstrated that models such as ChatGPT and Claude were particularly effective in proposing secure coding alternatives.

B. *Scenario 2 – Secure Registration Form*

This secure registration system, built using prepared statements and "password_hash()", was designed to assess the tools' ability to recognize positive (secure) examples. Claude and ChatGPT accurately identified the code as secure and further recommended enhancements such as enforcing password complexity, implementing CSRF tokens, and requiring HTTPS. DeepSeek and Gemini demonstrated moderate performance in this scenario, overlooking certain security best practices.

C. *Scenario 3 – Open-Source Project Analysis (SimpleLogin)*

This scenario was designed to evaluate the effectiveness of GenAI tools in analyzing real-world, open-source software with multi-module and ORM-based architectures. ChatGPT, DeepSeek, and Gemini demonstrated moderate success in this complex structure, occasionally overlooking potential vulnerabilities such as the use of raw SQL queries. Claude, on the other hand, delivered more consistent results, identifying potential input validation issues even in code segments that employed ORM practices, and was thus rated as high in performance.

The results suggest that while GenAI tools perform well in detecting classical vulnerabilities, their sensitivity tends to decrease in more complex and modular environments (e.g., GitHub-based projects). Claude's relatively more consistent performance is likely attributable to superior security context modeling

and code analysis capabilities. Future studies should include similar evaluations across other OWASP Top 10 vulnerability types (e.g., CSRF, IDOR, SSRF). Additionally, metrics such as false positive and false negative rates, processing time, and the impact of model version differences should be incorporated into subsequent evaluations.

The findings of this study indicate that GenAI-based tools are particularly effective in accurately identifying simple and classical security vulnerabilities (e.g., SQL injection). However, in more complex, multi-module applications employing ORM, their consistency and contextual reasoning capabilities remain limited. Claude's superior performance compared to the other models can likely be attributed to its broader context modeling capacity. Figure 3 presents the TP, FP, FN values and the calculated Precision, Recall, and F1 metrics based on the experimental results.

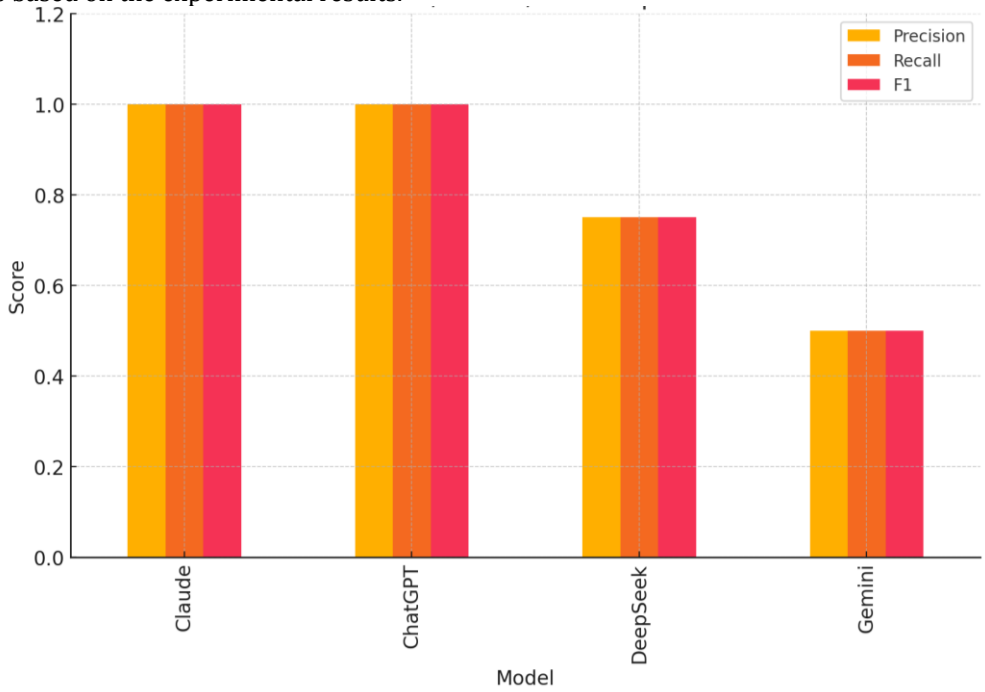


Figure 7. TP, FP, FN and the computed Precision, Recall, and F1 metrics.

Figure 3 illustrates the validation process, which was conducted manually by the project team for each scenario. Every code block was reviewed line by line to identify actual security vulnerabilities. These verified issues were then compared with the outputs generated by the LLM models to calculate the TP (True Positives), FP (False Positives), and FN (False Negatives) values.

While the explanation quality of the GenAI tools was generally satisfactory, some cases revealed suggestions that were either insufficient or overly generic. This was particularly evident in the analysis of secure applications (Scenario 2), where the tools tended to generate unnecessary warnings. Unlike previous studies that primarily evaluated the code generation capabilities of GenAI models, this work stands out as one of the first comprehensive comparative analyses specifically focused on their performance in a security context. However, the limited number of test scenarios and the partially qualitative nature of the evaluation criteria may restrict the generalizability of the results.

The four GenAI models evaluated in this study were tested using their most recent versions and through official access methods. ChatGPT was accessed via API using the May 2025 release of the GPT-4o model, based on OpenAI's GPT-4-turbo architecture. This model is noted for its high accuracy and rapid response times. Claude was represented by the Claude 3 Opus model, the most advanced version currently offered by Anthropic, and it stood out for its consistency in explanations and remediation suggestions. For DeepSeek, the April 2025 release of DeepSeek-Coder 6B was used. While this model is proficient in code generation, it produced inconsistent and superficial responses in some security analyses. Lastly, Gemini was evaluated using Google's Gemini 1.5 Pro model, also released in May 2025. Although Gemini frequently identified basic security concerns, it occasionally produced overly general responses that lacked contextual relevance. The distinct characteristics and response strategies of these model versions directly influenced the outcomes, and therefore, each has been explicitly documented within the scope of this study.

IV. TARTIŞMA

In this study, the capabilities of four different GenAI models to detect and analyze software security vulnerabilities were comparatively evaluated across three distinct scenarios. The results demonstrated that the tools achieved high success rates, particularly when identifying well-known vulnerabilities. Among the evaluated models, Claude consistently produced the most comprehensive and reliable outputs across all scenarios, whereas the other models exhibited certain limitations in specific areas. The demonstrated effectiveness of GenAI models in the security domain suggests that they can be successfully integrated into various applications in the future, such as continuous security auditing, automated code review, and educational purposes.

Recommendations for future work include:

- Evaluating additional vulnerability types covered by the OWASP Top 10,
- Conducting analyses across different programming languages and frameworks,
- Quantitatively assessing time/cost efficiency and false positive/negative rates,
- Testing integration scenarios within real CI/CD environments.

V. IMPLICATIONS

In this study, the vulnerability detection capabilities of ChatGPT, Claude, DeepSeek, and Gemini were evaluated within a multi-scenario web application security framework. The findings demonstrate that GenAI-based systems are highly effective in identifying classical vulnerabilities such as SQL Injection and XSS. However, their contextual reasoning capabilities remain limited in complex and multi-module software architectures. Among the evaluated models, Claude consistently achieved the most reliable performance, whereas the other models occasionally produced superficial or incomplete analyses. Overall, the results indicate that large language models hold considerable potential as supportive tools in software security processes; however, their reliable and sustainable integration into real-world security workflows requires broader evaluations and further domain-specific improvements.

ACKNOWLEDGMENT

I would like to thank my department faculty members for their academic and technical support.

REFERENCES

[1] V. Q. Nguyen, V. H. Nguyen, L. T. Ngo, L. M. Nguyen, and N.-A. Le-Khac, "Variational Deep Clustering approaches for anomaly-based cyber-attack detection," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 240, p. 104182, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104182.

[2] M. S. Chughtai, I. Bibi, S. Karim, S. W. A. Shah, A. A. Laghari, and A. A. Khan, "Deep learning trends and future perspectives of web security and vulnerabilities," *Journal of High Speed Networks*, vol. 30, no. 1, pp. 115–146, 2024, doi: 10.3233/JHS-230037.

[3] A. Paul, V. Sharma, and O. Olukoya, "SQL injection attack: Detection, prioritization & prevention," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 85, p. 103871, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jisa.2024.103871.

[4] A. Kumar, S. Dutta, and P. Pranav, "Analysis of SQL injection attacks in the cloud and in WEB applications," *SECURITY AND PRIVACY*, vol. 7, no. 3, May 2024, doi: 10.1002/spy2.370.

[5] D. Huang, C. Yan, Q. Li, and X. Peng, "From Large Language Models to Large Multimodal Models: A Literature Review," Jun. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app14125068.

[6] A. C. Doris *et al.*, "DesignQA: A Multimodal Benchmark for Evaluating Large Language Models' Understanding of Engineering Documentation," Apr. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2404.07917

[7] H. Zhao *et al.*, "Explainability for Large Language Models: A Survey," *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 15, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.1145/3639372.

[8] B. Arasteh, B. Aghaei, B. Farzad, K. Arasteh, F. Kiani, and M. Torkamanian-Afshar, "Detecting SQL injection attacks by binary gray wolf optimizer and machine learning algorithms," *Neural Comput Appl*, vol. 36, no. 12, pp. 6771–6792, 2024, doi: 10.1007/s00521-024-09429-z.

[9] A. G. Kakisim, "A deep learning approach based on multi-view consensus for SQL injection detection," *Int J Inf Secur*, vol. 23, no. 2, pp. 1541–1556, 2024, doi: 10.1007/s10207-023-00791-y.

[10] K. S. Sangher, A. Singh, H. M. Pandey, and V. Kumar, "Towards Safe Cyber Practices: Developing a Proactive Cyber-Threat Intelligence System for Dark Web Forum Content by Identifying Cybercrimes," *Information (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/info14060349.

[11] D. A. Sepúlveda Estay, R. Sahay, M. B. Barfod, and C. D. Jensen, "A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks," *Comput Secur*, vol. 97, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cose.2020.101996.

[12] G.-H. Luu *et al.*, "XSShield: A novel dataset and lightweight hybrid deep learning model for XSS attack detection," *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103363, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103363.

[13] X. Hou *et al.*, "Large Language Models for Software Engineering: A Systematic Literature Review," Aug. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2308.10620

[14] K. Tamberg and H. Bahsi, "Harnessing Large Language Models for Software Vulnerability Detection: A Comprehensive Benchmarking Study," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 29698–29717, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3541146.

[15] Y. Qu, S. Huang, and P. Nie, "A review of backdoor attacks and defenses in code large language models: Implications for security measures," Jun. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.infsof.2025.107707.
[16] J. Haurogné, N. Basheer, and S. Islam, "Vulnerability detection using BERT based LLM model with transparency obligation practice towards trustworthy AI," *Machine Learning with Applications*, vol. 18, p. 100598, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.mlwa.2024.100598.
[17] W. Wang, P. Yi, and H. Xu, "DoubleR: Effective XSS attacking reality detection," *Computer Networks*, vol. 251, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110567.
[18] Y. Said, A. A. Alsheikhy, H. Lahza, and T. Shawly, "Detecting phishing websites through improving convolutional neural networks with Self-Attention mechanism," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102643.
[19] J. Chen *et al.*, "When large language models meet personalization: perspectives of challenges and opportunities," *World Wide Web*, vol. 27, no. 4, p. 42, 2024, doi: 10.1007/s11280-024-01276-1.
[20] R. Bakır and H. Bakır, "Swift Detection of XSS Attacks: Enhancing XSS Attack Detection by Leveraging Hybrid Semantic Embeddings and AI Techniques," *Arab J Sci Eng*, vol. 50, no. 2, pp. 1191–1207, 2025, doi: 10.1007/s13369-024-09140-0.
[21] P. Kumar, "Large language models (LLMs): survey, technical frameworks, and future challenges," *Artif Intell Rev*, vol. 57, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10888-y.
[22] J. Hua Li, "Cyber security meets artificial intelligence: a survey," Dec. 01, 2018, *Zhejiang University*. doi: 10.1631/FITEE.1800573.
[23] M. Schmitt and I. Flechais, "Digital deception: generative artificial intelligence in social engineering and phishing," *Artif Intell Rev*, vol. 57, no. 12, p. 324, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10973-2.
[24] Z. Zhang, H. Al Hamadi, E. Damiani, C. Y. Yeun, and F. Taher, "Explainable Artificial Intelligence Applications in Cyber Security: State-of-the-Art in Research," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 93104–93139, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3204051.
[25] S. M. Taghavi Far and F. Feyzi, "Large language models for software vulnerability detection: a guide for researchers on models, methods, techniques, datasets, and metrics," *Int J Inf Secur*, vol. 24, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.1007/s10207-025-00992-7.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Yapay Zeka Tekniklerinin Çevresel Sistemlerin Yönetimindeki Rolü: Güncel ve Eleştirel Bir Değerlendirme

*Oğuz Şahiner**

Düzce Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** oguzsahiner@duzce.edu.tr

ÖZET

Çevresel sistemlerin yönetimi; çok sayıda değişken içeren, doğrusal olmayan etkileşimler barındıran ve yüksek düzeyde belirsizlik içeren karmaşık süreçlerden oluşmaktadır. Bu karmaşık yapı, geleneksel deterministik ve istatistiksel modelleme yaklaşımlarının birçok durumda sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, yapay zeka (YZ) tekniklerinin çevresel sistemlerin yönetimindeki rolü güncel literatür ışığında eleştirel bir bakış açısıyla incelenmiş ve çevre mühendisliği uygulamalarına sağladığı katkılar sistematik olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapay sinir ağları (YSA), makine öğrenmesi yöntemleri, derin öğrenme, bulanık mantık ve hibrit YZ modelleri ele alınmış; bu tekniklerin su ve atıksu yönetimi, hava kalitesi izleme ve tahmini, katı atık yönetimi ile iklim değişikliği ve çevresel risk yönetimi alanlarındaki uygulamaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Literatürdeki bulgular, YZ tabanlı modellerin çevresel sistemlerin izlenmesi, tahmini ve optimizasyonunda yüksek doğruluk sağladığını ve karar destek süreçlerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, YZ uygulamalarının büyük ve kaliteli veri gereksinimi, model yorumlanabilirliği (kara kutu etkisi), yüksek hesaplama maliyetleri ve YZ'nin kendi çevresel ayak izi gibi önemli sınırlılıkları bulunduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, çalışmada özellikle açıklanabilir yapay zeka (XAI) yaklaşımlarının ve fiziksel temelli modeller ile YZ tekniklerinin entegre edildiği hibrit modelleme yaklaşımlarının önemi vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma; farklı çevresel sistemler ve YZ tekniklerini bütüncül bir çerçevede ele alarak, mevcut literatürdeki parçalı yaklaşımları sentezlemekte ve çevresel yönetimde YZ'nin stratejik bir karar destek aracı olarak konumlandırılmasına yönelik yönlendirici bir değerlendirme sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Çevresel sistemler, Çevresel yönetim, Hava kalitesi, İklim değişikliği, Su yönetimi, Yapay zeka.*

The Role of Artificial Intelligence Techniques in Environmental Systems Management: A Contemporary and Critical Review

*Oguz Sahiner**

Düzce University, Department of Construction Works and Technical Affairs, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** oguzsahiner@duzce.edu.tr

ABSTRACT

Environmental system management consists of complex processes characterized by numerous variables, nonlinear interactions, and high levels of uncertainty. This complexity often limits the applicability and performance of traditional deterministic and statistical modeling approaches. In this study, the role of artificial intelligence (AI) techniques in environmental system management is critically examined in light of the recent literature, and their contributions to environmental engineering applications are systematically evaluated. Artificial neural networks (ANNs), machine learning methods, deep learning, fuzzy logic, and hybrid AI models are reviewed, and their applications in water and wastewater management, air quality monitoring and prediction, solid waste management, and climate change and environmental risk management are comparatively analyzed. Findings from the literature indicate that AI-based models provide high accuracy in monitoring, prediction, and optimization of environmental systems and significantly enhance decision-support processes. However, major limitations of AI applications are also identified,

including the need for large and high-quality datasets, limited model interpretability (the “black-box” effect), high computational costs, and the environmental footprint of AI technologies themselves. In this context, the study emphasizes the importance of explainable artificial intelligence (XAI) approaches and hybrid modeling frameworks that integrate physics-based models with AI techniques. Overall, this study synthesizes fragmented research across different environmental systems and AI methodologies within a unified framework and provides a guiding assessment for positioning AI as a strategic decision-support tool in sustainable environmental management.

Keywords: *Air quality, Artificial intelligence, Climate change, Environmental management, Environmental systems, Water management.*

I. GİRİŞ

Çevresel sistemlerin yönetimi, çok boyutlu ve birbirleriyle etkileşim halinde olan süreçleri kapsamaktadır. Bu sistemler su, hava kalitesi, atık yönetimi ve iklim değişikliği olarak sayılabilir. Bu sistemlerin yönetiminde deterministik ve istatistiksel modelleme yaklaşımları yetersiz kalabilmektedir. Özellikle karmaşık çevresel süreçlerin tahmini ve yönetimi, klasik yöntemlerle sınırlı doğrulukta gerçekleştirilebilmektedir.

Bu noktada yapay zeka (YZ) teknikleri, çevresel sistemlerin modellenmesi ve yönetimi için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [1]. YZ, büyük ve heterojen veri setlerinden anlamlı örüntüler çıkarabilme, belirsizlikleri yönetebilme ve karmaşık ilişkileri yüksek doğrulukla öğrenebilme özelliklerine sahiptir. Bu sebeple çevre mühendisliği uygulamalarında giderek daha yaygın biçimde kullanılmaktadır [2].

Son yıllarda sensör teknolojileri, uzaktan algılama sistemleri ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarındaki gelişmeler, çevresel verilerin artışına sebep olmuştur. Bu büyük veri yapısının etkin biçimde analiz edilmesi geleneksel yöntemlerle sınırlı ve zor olabilmektedir. Bu durum YZ tabanlı modelleme ve karar destek yaklaşımlarını çevresel yönetim açısından kritik hale getirmektedir [3].

Mevcut literatürde YZ’nin çevresel sistemlerdeki uygulamalarını ele alan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmı tek bir çevresel sistem (örneğin yalnızca hava kalitesi) veya tek bir YZ tekniği (örneğin yalnızca derin öğrenme) üzerine yoğunlaşmaktadır. Ayrıca, model performansına odaklanılırken yorumlanabilirlik, sürdürülebilirlik ve YZ’nin çevresel etkileri gibi konuların görece sınırlı ele alındığı görülmektedir.

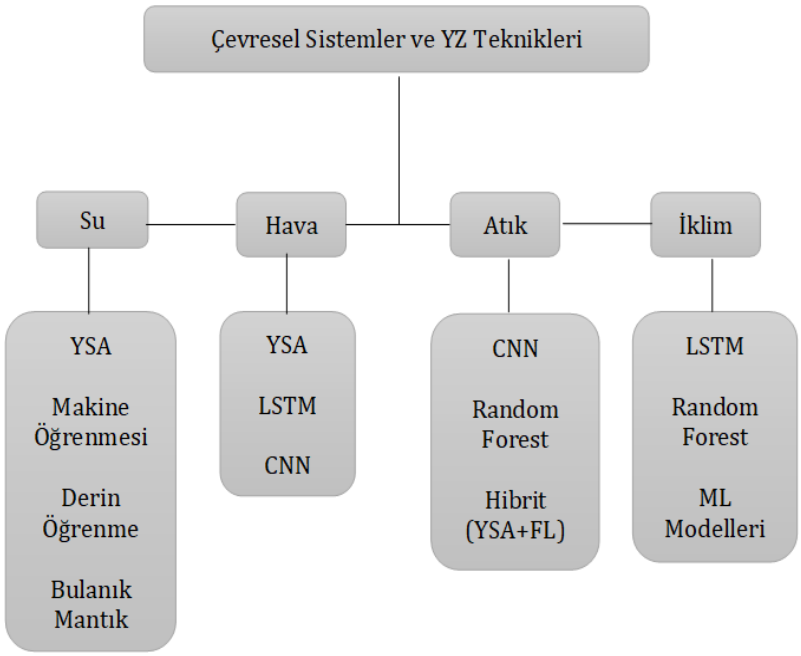
Bu çalışmanın amacı; çevre mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan YZ tekniklerini çevresel sistemler bağlamında, eleştirel ve bütüncül bir çerçeve içerisinde değerlendirmektir. Bu tekniklerin avantajlarını, sınırlılıklarını ve gelecekteki araştırma yönelimlerini güncel literatür ışığında ortaya koymaktır. Bu yönüyle çalışma, YZ’nin çevresel sistemlerin sürdürülebilir yönetimindeki rolünü yalnızca teknik bir araç olarak değil, stratejik bir karar destek unsuru olarak ele almaktadır.

A. Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemsel Yaklaşımı

Bu çalışma, anlatı temelli bir literatür derlemesi olarak tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında 2000–2025 yılları arasında yayımlanmış, ağırlıklı olarak Web of Science ve Scopus veri tabanlarında indekslenen hakemli dergilerde yer alan çalışmalar taranmıştır. Literatür taramasında “artificial intelligence”, “machine learning”, “environmental systems”, “water management”, “air quality” ve “climate change” anahtar kelimeleri birlikte kullanılmıştır. Seçilen çalışmalar, kullanılan YZ teknikleri, uygulama alanları ve raporlanan avantajlar ile sınırlılıklar açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, çevresel sistemlerin yönetiminde YZ uygulamalarına ilişkin güncel eğilimlerin bütüncül biçimde değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

II. YZ TEKNİKLERİNE GENEL BAKIŞ

YZ, bilgisayar sistemlerinin öğrenme, akıl yürütme ve karar verme gibi insan bilişsel yeteneklerini taklit edebilmesini amaçlayan yöntemler bütünüdür. Çevresel sistemler, YZ tekniklerinin etkin biçimde uygulanabildiği alanlar arasında yer almaktadır. Bunun sebebi çok sayıda değişken içermeleri, doğrusal olmayan davranışlar sergilemeleri ve belirsizlik barındırmaları olarak sayılabilir. Son yıllarda çevresel verilerin hacminin ve çeşitliliğinin artması, YZ tabanlı modelleme ve analiz yaklaşımlarını çevre mühendisliğinde önemli bir araç haline getirmiştir [4], [5]. Çevresel sistemlerin yönetiminde kullanılan başlıca yapay zeka teknikleri ve bu tekniklerin uygulama alanlarıyla olan ilişkisi Şekil 1’de bütüncül bir bakış açısıyla özetlenmektedir.



Şekil 1. Çevresel sistemlerin yönetiminde kullanılan başlıca yapay zeka teknikleri ile bu tekniklerin izleme, tahmin, optimizasyon ve karar destek süreçleri arasındaki ilişkileri gösteren kavramsal çerçeve

B. YSA

YSA, biyolojik sinir sisteminden esinlenerek geliştirilen ve girdi çıktı arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenebilen algoritmalardır. YSA'lar özellikle doğrusal olmayan çevresel süreçlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Su ve atıksu arıtma tesislerinde proses performansının tahmini, hava kirliliği parametrelerinin modellenmesi ve çevresel kalite göstergelerinin öngörülmesi gibi uygulamalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir [6], [7]. YSA'ların en önemli avantajı, sistemin fiziksel yapısına ilişkin ayrıntılı denklemlere ihtiyaç duymadan yalnızca veriye dayalı öğrenme gerçekleştirebilmesidir.

C. Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin açıkça programlanmadan verilerden öğrenmesini sağlayan algoritmaları kapsamaktadır. Denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve yarı denetimli öğrenme olmak üzere farklı yaklaşımlar içermektedir. Karar ağaçları, destek vektör makineleri (SVM), k-en yakın komşu (k-NN) ve rastgele orman (Random Forest) algoritmaları, çevresel sınıflandırma ve tahmin problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler, hava kalitesi tahmini, su kalite sınıflandırması ve çevresel risk değerlendirmesi gibi alanlarda yüksek doğruluk ve görece iyi yorumlanabilirlik sunmaktadır [8], [9].

D. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, çok katmanlı YSA'na dayanan ve özellikle büyük veri setleri üzerinde yüksek performans gösteren bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Uzun kısa süreli bellek (LSTM) ağları ve evrişimli sinir ağları (CNN), zaman serisi ve uzaktan algılama verilerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava kalitesi tahminleri, iklim değişkenlerinin modellenmesi ve arazi kullanımı analizlerinde derin öğrenme yöntemlerinin geleneksel modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığı bildirilmektedir [5], [10]. Bununla birlikte, bu yöntemlerin yüksek hesaplama maliyeti ve büyük veri gereksinimi gibi sınırlılıkları bulunmaktadır.

E. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, kesin sınırlar yerine belirsizlik içeren ifadelerle çalışan bir YZ yaklaşımıdır. Çevresel sistemlerde sıkça karşılaşılan belirsizlikler ve uzman görüşlerine dayalı değerlendirmeler, bulanık mantık modelleri ile etkili bir şekilde temsil edilebilmektedir. Su kalite sınıflandırması, çevresel risk analizi ve karar destek sistemlerinde bulanık mantık temelli yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır [11], [12]. Bu yöntem, özellikle nicel verilerin sınırlı olduğu durumlarda avantaj sağlamaktadır.

F. Hibrit YZ Modelleri

Son yıllarda, farklı YZ tekniklerinin birlikte kullanıldığı hibrit modeller çevresel uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. YSA ile bulanık mantık veya genetik algoritmaların entegrasyonu, model doğruluğunu ve

esnekliğini artırmaktadır. Bu hibrit yaklaşımlar, çevresel sistemlerin karmaşık ve çok boyutlu yapısının daha gerçekçi bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır [9], [13].

III. Çevresel Sistemlerin Yönetiminde YZ Uygulamaları

YZ teknikleri, çevresel sistemlerin izlenmesi, tahmini ve yönetiminde giderek artan şekilde kullanılmaktadır [1], [14]. Bu bölümde, su-atıksu yönetimi, hava kalitesi tahmini, katı atık yönetimi ve iklim değişikliği gibi temel uygulama alanları örnekler ve güncel araştırmalar ışığında ele alınmaktadır. Ayrıca, entegre karar destek sistemleriyle çevresel yönetimdeki rolü incelenmektedir.

A. Su ve Atıksu Yönetimi

Su kaynakları ve atıksu arıtma sistemleri, çok sayıda değişken ve doğrusal olmayan biyolojik kimyasal süreç içermektedir. YZ, bu sistemlerde veri odaklı tahmin**,** optimizasyon ve performans değerlendirme için güçlü bir araç olarak kullanılır. YSA ve makine öğrenmesi algoritmaları, proses parametrelerinin tahmini, arıtma etkinliğinin izlenmesi ve enerji kullanımının optimize edilmesinde başarıyla uygulanmaktadır [14]. YZ ile su ve atıksu yönetimine ilişkin yapılmış bazı çalışmalar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. YZ ile su ve atıksu yönetimine ilişkin çalışmalar

YZ Tekniği	Uygulama Alanı	Veri Kaynağı	Avantaj	Kaynak
YSA	Proses parametre tahmini	Sensör verileri	Yüksek doğruluk, model esnekliği	[6], [7]
LSTM	Kısa dönem tahminler	Zaman serisi verisi	Gerçek zamanlı öngörü, enerji tasarrufu	[1], [14]
Random Forest	Su kalite sınıflandırması	Kimyasal analiz verisi	Yorumlanabilir sonuç, hızlı eğitim	[8]

B. Hava Kalitesi İzleme ve Tahmini

Hava kirliliği, meteorolojik faktörler ve insan kaynaklı emisyonlarla değişkenlik göstermektedir. YZ tabanlı modeller, zaman serisi tahmini**,** mekansal modelleme ve erken uyarı sistemleri için kullanılmaktadır [10]. LSTM ve CNN modelleri $PM_{2.5}$, NO_2 ve O_3 gibi kirletici parametreleri yüksek doğrulukla tahmin ederek yöneticilere karar destek sağlamaktadır. YZ ile hava kalitesi izleme ve tahminine ilişkin yapılmış bazı çalışmalar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. YZ ile hava kalitesi izleme ve tahminine ilişkin çalışmalar

Model	Hedef Parametre	Veri Kaynağı	Avantaj	Kaynak
LSTM	$PM_{2.5}$, NO_2	Meteoroloji + Sensör	Zaman serisi tahmininde yüksek doğruluk	[10], [15]
CNN	Uydu görüntüleri ile mekansal modelleme	Uydu ve sensör verisi	Mekansal analiz ve görselleştirme	[5]
Random Forest	Hava kalitesi sınıflandırması	Geçmiş ölçümler	Hızlı ve yorumlanabilir sonuç	[16]

C. Katı Atık Yönetimi

Katı atık yönetimi, toplama, sınıflandırma ve geri dönüşüm süreçlerini kapsamaktadır. YZ, rotaların optimizasyonu**,** otomatik sınıflandırma ve kaynak kullanımının artırılması için kullanılmaktadır. Derin öğrenme ve makine öğrenmesi tabanlı görüntü işleme teknikleri, atık türlerinin otomatik olarak tanımlanmasını sağlamaktadır [17], [18]. YZ ile katı atık yönetimine ilişkin yapılmış bazı çalışmalar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. YZ ile katı atık yönetimine ilişkin çalışmalar

YZ Tekniği	Uygulama Alanı	Veri Kaynağı	Avantaj	Kaynak
CNN	Görüntü tabanlı sınıflandırma	Kamera görüntüleri	Otomatik ayırma, yüksek doğruluk	[18]
Random Forest	Atık miktarı tahmini	Toplama kayıtları	Tahmin doğruluğu, hızlı eğitim	[17]
Hibrit (YSA + Bulanık Mantık)	Toplama optimizasyonu	Sensör ve rota verileri	Enerji tasarrufu ve rotaların optimize edilmesi	[9], [13]

D. İklim Değişikliği ve Çevresel Risk Yönetimi

İklim değişikliği, çevresel sistemlerin sürdürülebilir yönetimi açısından önemli riskler doğurmaktadır. Bu riskler arasında sıcaklık değişimleri, sel, taşkın ve kuraklık gibi aşırı olaylar yer almaktadır. YZ ve makine

öğrenmesi (ML) teknikleri, iklim parametrelerinin tahmini, risk analizleri ve sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel modellere göre daha esnek, verimli ve yüksek doğruluklu performans gösterebilmektedir [19], [20].

D.1. İklim Parametrelerinin Tahmini

YZ ve ML modelleri, iklimdeki sıcaklık, yağış ve nem gibi parametreleri tahmin etmek için geniş ölçekli veri kümelerini analiz ederek zorlayıcı fiziksel süreçleri veri örüntülerine dönüştürebilir. Bu yaklaşımlar, özellikle iklim projeksiyonlarının bölgesel detaylarını daha doğru yansıtma potansiyeli ile öne çıkmaktadır [19].

D.2. Sel, Kuraklık ve Taşkın Risk Analizleri

Sel ve taşkın gibi doğal afetlerin risk analizi, çok değişkenli çevresel verilerle yapılmaktadır. YZ tabanlı modeller meteorolojik, arazi ve hidrolojik verileri bütünleştirerek taşkın eğilimleri ve kuraklık koşullarını daha detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Bu modeller, risk haritalama ve erken uyarı için zemin sağlar. Ayrıca ML algoritmaları, geçmiş iklim verilerini öğrenerek uzun dönem kuraklık projeksiyonları yapabilir. Böylece su kaynakları yönetimi ve tarımsal planlama gibi alanlarda karar destek sistemi işlevi görür [21].

D.3. Karbon Emisyonu ve Sürdürülebilirlik Göstergeleri

Karbon emisyonlarının izlenmesi ve sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirilmesi, iklim politikalarının etkinliğini anlamak için kritik öneme sahiptir. YZ ile emisyon izleme ve politika senaryoları değerlendirmeleri**,** büyük iklim veri setlerinden öğrenerek yapılabilmektedir. Bu sayede sürdürülebilirlik hedeflerine ilişkin stratejiler geliştirilebilir [20]. İklim değişikliği ve çevresel risk yönetimi alanında yaygın olarak kullanılan YZ teknikleri ve uygulama örneklerine ilişkin yapılmış bazı çalışmalar Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. YZ ile iklim değişikliği ve çevresel risk yönetimine ilişkin çalışmalar

YZ Tekniği	Uygulama Alanı	Kullanım Amacı	Kaynak
Random Forest, LSTM	İklim parametre tahmini	Sıcaklık, yağış vb. tahminleri	[19]
LSTM, ML modelleri	Sel ve taşkın risk analizi	Risk haritaları, erken uyarı	[21]
Random Forest	Kuraklık tahmini	Su stresi değerlendirme	[21], [22]
Veri analitiği, öngörü modelleri	Sürdürülebilirlik göstergeleri	Emisyon, adaptasyon planları	[20], [22]

IV. YZ Kullanmanın Avantajları Ve Sınırlılıkları

YZ teknikleri, çevresel sistemlerin modellenmesi, izlenmesi ve yönetiminde sunduğu önemli katkılarla birlikte çeşitli sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Bu bölümde, YZ'nin çevresel uygulamalardaki başlıca avantajları ve sınırlılıkları akademik literatür ışığında ele alınmaktadır.

A. Avantajlar

YZ teknikleri, çevresel sistemlerin modellenmesinde özellikle yüksek doğrulukta tahmin üretme, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme ve büyük veri kümeleriyle çalışabilme kapasiteleri sayesinde önemli avantajlar sunmaktadır [23]. Veri odaklı öğrenme yöntemleri, büyük ve karmaşık çevresel veri kümeleri üzerinde örüntüleri etkili biçimde öğrenerek gerçek zamanlı tahminlerin yapılmasını sağlamaktadır [3]. Bu özellikler, erken uyarı sistemleri, gerçek zamanlı izleme ve senaryo analizleri gibi uygulamalarda çevresel yönetimin etkinliğini artırmaktadır.

YZ tabanlı modeller, geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığı çok boyutlu ve dinamik çevresel süreçlerin temsil edilmesine olanak tanıyarak, su kaynakları yönetimi, hava kalitesi tahmini ve iklim risk analizi gibi alanlarda karar vericilere güçlü destek sağlamaktadır [1], [3].

B. Sınırlılıklar

YZ uygulamalarının çevresel sistemlerde kullanımı önemli sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. En temel sorunlardan biri, yüksek kaliteli ve uzun süreli veri gereksinimidir. Eksik veya dengesiz veriler, YZ modellerinin genellenebilirliğini ve güvenilirliğini ciddi biçimde azaltabilmektedir. Bir diğer önemli sınırlılık, özellikle derin öğrenme tabanlı modellerde ortaya çıkan yorumlanabilirlik eksikliğidir. "Kara kutu" niteliğindeki bu modeller, elde edilen sonuçların çevresel yöneticiler ve politika yapıcılar tarafından anlaşılmasını zorlaştırmakta ve modele duyulan güveni azaltabilmektedir [24].

Ayrıca, YZ modellerinin eğitimi ve işletilmesi yüksek hesaplama gücü ve enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu durum, YZ teknolojilerinin kendi çevresel ayak izini gündeme getirerek sürdürülebilirlik tartışmalarında yeni bir boyut oluşturmaktadır [25].

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, YZ tekniklerinin çevresel sistemlerin yönetimindeki rolü güncel literatür ışığında ele alınmıştır. Çevre mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan YZ yaklaşımlarının su-atıksu yönetimi, hava kalitesi izleme ve tahmini, katı atık yönetimi ile iklim değişikliği ve çevresel risk yönetimi alanlarındaki uygulamaları bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar, YZ tabanlı modellerin çevresel sistemlerin çok değişkenli, doğrusal olmayan ve belirsizlik içeren yapılarının modellenmesinde geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Literatür bulguları, özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının; hava ve su kalitesi tahminleri, arıtma proseslerinin izlenmesi ve optimizasyonu ile çevresel risk analizlerinde yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu özellikler, YZ tekniklerini çevresel izleme, erken uyarı ve karar destek sistemleri açısından güçlü araçlar haline getirmektedir. Sensör teknolojileri, uzaktan algılama ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarıyla entegre edilen YZ tabanlı sistemlerin, çevresel yönetimde daha aktif ve gerçek zamanlı yaklaşımların benimsenmesine olanak tanıdığı görülmektedir.

Bununla birlikte, YZ uygulamalarının çevresel sistemlerde kullanımı önemli sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Büyük ve yüksek kaliteli veri setlerine duyulan gereksinim, özellikle veri eksikliği veya dengesizliğinin yaygın olduğu bölgelerde model performansını sınırlamaktadır. Ayrıca, derin öğrenme tabanlı yaklaşımlarda öne çıkan yorumlanabilirlik eksikliği ("kara kutu" etkisi), YZ modellerinin çevresel yöneticiler ve politika yapıcılar tarafından güvenle kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Yüksek hesaplama maliyetleri ve enerji tüketimi ise YZ'nin kendi çevresel ayak izini gündeme getirerek sürdürülebilirlik açısından kritik bir tartışma alanı oluşturmaktadır.

Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalar için iki temel yönelim öne çıkmaktadır. Birincisi, açıklanabilir yapay zeka (XAI) yaklaşımlarının çevresel uygulamalara entegre edilmesi, YZ modellerinin şeffaflığını ve karar destek süreçlerindeki güvenilirliğini artıracaktır. İkincisi ise fiziksel temelli modeller ile YZ tekniklerinin birleştirildiği hibrit modelleme yaklaşımlarının yaygınlaştırılmasıdır. Bu tür yaklaşımlar, hem model doğruluğunu artırma hem de çevresel süreçlerin fiziksel anlamlılığını koruma potansiyeline sahiptir.

Çalışmanın literatüre katkısı üç temel noktada öne çıkmaktadır:

(i) Çevre mühendisliği bağlamında kullanılan yapay zeka teknikleri, farklı çevresel sistemleri kapsayacak şekilde güncel literatür ışığında sistematik ve karşılaştırmalı biçimde sınıflandırılmıştır.

(ii) Mevcut çalışmaların büyük ölçüde tek bir çevresel sistem veya tek bir YZ yaklaşımına odaklanan parçalı yapısına dikkat çekilerek, bu yaklaşımların sınırlılıkları eleştirel bir bakış açısıyla tartışılmıştır.

(iii) Açıklanabilir yapay zeka (XAI) ve fiziksel temelli YZ hibrit modelleme yaklaşımlarının çevresel yönetimdeki stratejik önemi vurgulanarak, gelecekteki araştırmalar için yönlendirici bir çerçeve sunulmuştur.

Sonuç olarak, YZ teknikleri çevresel sistemlerin sürdürülebilir yönetiminde önemli fırsatlar sunan güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu potansiyelin etkin ve sorumlu biçimde kullanılabilmesi için YZ modellerinin veri kalitesi, yorumlanabilirlik, hesaplama maliyetleri ve çevresel etkiler açısından bütüncül bir değerlendirme çerçevesi içerisinde ele alınması gerekmektedir. Bu çalışma, farklı çevresel sistemler ve YZ yaklaşımlarını sentezleyerek, çevresel yönetimde YZ'nin karar destek unsuru olarak konumlandırılmasına yönelik yönlendirici bir değerlendirme sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Y. Sun, "Applications of artificial intelligence in environmental engineering," *Scientific Journal of Intelligent Systems Research*, vol. 6, no. 1, pp. 45–58, 2025.

[2] R. Kumar, S. Pandey, A. Saxena, and P. Sharma, "Sustainable solutions through AI in environmental engineering: Monitoring, modeling, and mitigation strategies," *Global Research Journal of Engineering, Science and Technology Management*, vol. 12, no. 2, pp. 101–115, 2025.

[3] A. I. Maqbool, Zaib-un-Nisa, S. Kiayani, and A. Safdar, "Artificial intelligence in environmental science and engineering: A review of applications, challenges, and sustainable futures," *Spectrum of Engineering Sciences*, vol. 3, no. 6, pp. 861–876, 2025.

[4] M. Reichstein, G. Camps-Valls, B. Stevens, M. Jung, J. Denzler, N. Carvalhais, and Prabhat, "Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science," *Nature*, vol. 566, pp. 195–204, 2019.

[5] A. Konya and P. Nematzadeh, "Recent applications of AI to environmental disciplines: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 906, p. 167705, 2024.

[6] H. R. Maier and G. C. Dandy, "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review," *Environmental Modelling & Software*, vol. 15, no. 1, pp. 101–124, 2000.

[7] M. M. Hamed, M. G. Khalafallah, and E. A. Hassanien, "Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks," *Environmental Modelling & Software*, vol. 19, no. 10, pp. 919–928, 2004.

[8] M. Méndez, M. G. Merayo, and M. Núñez, "Machine learning algorithms to forecast air quality: A survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, pp. 10031–10066, 2023.

[9] M. Zounemat-Kermani, O. Batelaan, M. Fadaee, and R. Hinkelmann, "Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review," *Journal of Hydrology*, vol. 598, p. 126266, 2021.

[10] X. Zhu and B. Liu, “A review of machine learning for modeling air quality: Overlooked but important issues,” *Atmospheric Research*, vol. 300, p. 107261, 2024.
[11] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
[12] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
[13] R. J. Abrahart, L. M. See, and D. P. Solomatine, *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010.
[14] Y. Wang, Y. Cheng, H. Liu, Q. Guo, C. Dai, M. Zhao, and D. Liu, “A review on applications of artificial intelligence in wastewater treatment,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13557, 2023.
[15] R. Navares and J. L. Aznarte, “Predicting air quality with deep learning LSTM: Towards comprehensive models,” *Ecological Informatics*, vol. 55, p. 101019, 2020.
[16] M. Karmoude, A. El Amrani, H. Oukouchoud, Y. El Bouzekri El Idrissi, and M. El Yacoubi, “Machine learning for air quality prediction and data analysis: Review on recent advancements, challenges, and outlooks,” *Science of the Total Environment*, vol. 1002, p. 180593, 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180593.
[17] I. Belyamani, “Artificial intelligence in waste management systems: Towards circular economy,” *Science of the Total Environment*, vol. 907, p. 167029, 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.167029.
[18] B. Fang, J. Yu, Z. Chen, A. I. Osman, M. Farghali, I. Ihara, E. H. Hamza, D. W. Rooney, and P.-S. Yap, “Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 1959–1989, 2023, doi: 10.1007/s10311-023-01604-3.
[19] K. Ukoba, O. R. Onisuru, T. C. Jen, D. M. Madyira, and K. O. Olatunji, “Predictive modeling of climate change impacts using artificial intelligence: A review for equitable governance and sustainable outcome,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, pp. 10705–10724, 2025.
[20] A. Srivastava and R. Maity, “Assessing the potential of AI–ML in urban climate change adaptation and sustainable development,” *Sustainability*, vol. 15, no. 23, p. 16461, 2023.
[21] G. Camps-Valls, D. G. Miralles, J. Muñoz-Marí, M. Reichstein, Y. Chen, M. A. White, and M. Camps-Valls, “Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events,” *Nature Communications*, vol. 16, p. 1919, 2025, doi: 10.1038/s41467-025-1919.
[22] T. Amnuaylojaroen, “Advancements and challenges of artificial intelligence in climate modeling for sustainable urban planning,” *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 8, p. 1517986, 2025.
[23] D. B. Olawade, S. A. Ajayi, A. O. Olaniyan, O. O. Ojo, and A. E. Babalola, “Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions,” *Hygiene and Environmental Health Advances*, vol. 12, p. 100114, 2024.
[24] G. Shalu and R. Singh, “Environmental monitoring with machine learning,” *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research*, pp. 208–212, 2023.
[25] A. Pachot and C. Patissier, “Towards sustainable artificial intelligence: An overview of environmental protection uses and issues,” arXiv preprint arXiv:2212.11738, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2212.11738.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Okuma Yazma Bilmeyen 4-7 Yaş Grubu Çocuklar İçin Sesli Komut Destekli Mobil İngilizce Kelime Öğretim Uygulaması Geliştirilmesi

Zeynep Çalık, Elif Pınar Hacıbeyoğlu*

Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/Türkiye
***Sorumlu Yazar:** 220501008@kocaelisaglik.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, okuma yazma bilmeyen 4-7 yaş arası çocukların dil öğrenme süreçlerini desteklemek amacıyla geliştirilen, sesli komutlara dayalı bir mobil öğrenme uygulamasının tasarım sürecini ele almaktadır. Proje kapsamında çocukların metin okumaya ihtiyaç duymadan, konuşarak uygulama içinde ilerleyebilecekleri bir etkileşim yapısı tasarlanmıştır. Sistem; Flutter tabanlı bir mobil istemci, FastAPI altyapısına sahip bir sunucu katmanı ve çocuk sesine yönelik yüksek performans sunan OpenAI Whisper bileşeni üzerine kurgulanmıştır. Çalışmada teknik mimari, veri akış yapısı ve erken çocukluk pedagojisine uygun tasarım kararları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca uygulama içerisinde XP kazanımı ve karakter açma gibi oyunlaştırma unsurlarının, çocukların motivasyonunu artırmaya yönelik nasıl konumlandırıldığı ele alınmıştır. Bu tasarım yaklaşımı, erken çocukluk eğitimi ile yapay zekâ tabanlı konuşma teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik uygulanabilir bir zemin sunmaktadır. Sistemin teknik kararlılığı için ses verileri 16 kHz WAV formatında işlenmekte ve niyet analizi mekanizmasıyla komutlar ayrıştırılmaktadır. Kullanıcı ilerlemeleri ise internet kesintilerinden etkilenmemek amacıyla yerel NoSQL Hive veritabanı üzerinde güvenli bir şekilde saklanmaktadır.

***Anahtar* Kelimeler:** *Çocuk sesi tanıma, Erken çocukluk eğitimi, Oyunlaştırma, Sesli etkileşim, Whisper modeli.*

Development of a Voice Command Supported Mobile English Vocabulary Teaching Application for Pre-literate Children Aged 4-7

Zeynep Çalık, Elif Pınar Hacıbeyoğlu*

Kocaeli Health and Technology University,Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Kocaeli/Türkiye
* **Corresponding Author:** 220501008@kocaelisaglik.edu.tr

ABSTRACT

This study examines the design process and development of a voice-command-based mobile learning application intended to support the language acquisition of pre-literate children aged 4 to 7. Within the scope of the project, an interaction structure has been designed to allow children to navigate the application through speech, without relying on text-based interfaces. The proposed system is structured around a Flutter-based mobile client, a FastAPI-backed server layer, and the OpenAI Whisper speech recognition component. The technical architecture, data flow structure, and design decisions aligned with early childhood pedagogy are discussed in detail. In addition, planned gamification elements, such as XP accumulation and character unlocking, are addressed as motivational tools to encourage children's sustained participation. This design approach aims to provide an applicable starting point for the combined use of early childhood education principles and AI-based speech technologies. For technical stability, voice data is processed in 16 kHz WAV format and commands are parsed through an intent analysis mechanism. User progress is securely stored on a local NoSQL Hive database to ensure functionality remains unaffected by internet interruptions.

Keywords: *Child speech recognition, Early childhood education, Gamification, Voice interaction, Whisper model.*

I. GİRİŞ

Erken çocukluk dönemi (4-7 yaş), dil ediniminin en hızlı ve kalıcı olduğu kritik bir evredir. Ancak geleneksel mobil eğitim uygulamaları genellikle metin tabanlı arayüzlere ve okuma-yazma becerisine dayandığı için bu yaş grubunun bağımsız kullanımına tam olarak uygun değildir. Bu belge, okuma yazma bilmeyen 4-7 yaş arası çocukların yabancı dil öğrenme süreçlerini desteklemek amacıyla geliştirilen, sesli komutlara dayalı bir mobil öğrenme uygulamasının tasarım ve mimari sürecini sunmaktadır.

"Kid's English" adı verilen bu projem, söz konusu engelleri ortadan kaldırmayı ve çocukların konuşma çekincelerini teknoloji yardımıyla aşmalarını sağlamayı hedeflemektedir. Çalışmanın çıkış noktası, çocukları pasif birer izleyici olmaktan çıkararak sürece dahil eden yenilikçi bir dil öğrenme ekosistemi inşa etmektir. Bu doğrultuda geliştirilen sistem, çocukların ekran üzerinde herhangi bir metne ihtiyaç duymadan, yalnızca sesli komutlarla arayüzde gezinebilecekleri ve telaffuz pratiği yapabilecekleri yapay zekâ destekli bir altyapı sunmaktadır.

II. MATERYAL METOT

Bu çalışmada geliştirilen "Kid's English" adlı mobil dil öğretim platformu; yapay zekâ tabanlı ses işleme servislerini, oyunlaştırma stratejilerini ve kesintisiz veri kararlılığı sunan hibrit bir veri mimarisini (Hybrid Persistence) bir araya getiren istemci-sunucu (Client-Server) modeline dayanmaktadır. Sistemin uçtan uca operasyonel akışı, teknik bileşenleri ve veri yönetim stratejileri alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

A. Sistem Mimarisi ve Ön Yüz (Frontend) Katmanı

Uygulamanın kullanıcı arayüzü ve istemci tarafı, modern, yüksek performanslı ve nesne yönelimli bir dil olan **Dart** programlama dili ile **Flutter SDK** framework'ü kullanılarak platformlar arası (cross-platform) uyumlu olacak şekilde geliştirilmiştir. Okuma-yazma bilmeyen 4-7 yaş grubu çocukların dijital etkileşim ihtiyaçları göz önünde bulundurularak, arayüzün tamamı görsel ögeler ve sesli komut yapısı üzerine kurgulanmıştır.

Ön yüz katmanında ses kayıt, oynatma ve ses sentezi (Text-to-Speech) süreçlerinin donanımsal entegrasyonu için sırasıyla *record*, *just_audio*, *audioplayer* ve *flutter_tts* kütüphaneleri mimariye dahil edilmiştir. Uygulamanın temel ekran akışı şu modüllerden oluşmaktadır:

- **Sesli Giriş Ekranı (Voice Entry Screen):** Çocuk kullanıcının ekran üzerinde herhangi bir metin okumasına veya yazmasına gerek kalmadan, yalnızca sesli komut vererek sisteme giriş yapmasını sağlayan ilk etkileşim katmanıdır.
- **Ana Lobi (Home Lobby Screen):** Kullanıcının sesli ya da dokunmatik komutlarla "Play" (Oyna), "Games" (Oyunlar) ve "Badges" (Rozetler) modülleri arasında geçiş yapabildiği yönlendirici ana merkezdir.
- **Kategoriler Ekranı (Categories Screen):** Çocukların pedagojik gelişim seviyelerine uygun olarak gruplandırılmış kelime setlerinin (Hayvanlar, Aile, Okul vb.) dinamik olarak listelendiği alandır.

B. Arka Yüz (Backend) ve Sunucu Katmanı

Sistemin mantıksal iş kurallarını (business logic) ve yapay zekâ model entegrasyonunu yöneten arka yüz katmanı, Python tabanlı, asenkron yapısıyla yüksek hızlı ve düşük gecikmeli (low-latency) çözümler sunan **FastAPI** framework'ü ile tasarlanmıştır. Mobil istemci ile sunucu katmanı arasındaki tüm veri alışverişi, güvenli ve standardize edilmiş **RESTful API** mimarisi üzerinden JSON formatında gerçekleştirilmektedir. Sunucu katmanı temel olarak şu kritik operasyonları yürütmektedir:

- İstemciye dinamik kategori ve kelime verisi sağlanması,
- Ses analiz taleplerinin alınması ve yapay zekâ modeline yönlendirilmesi,
- Kullanıcı profili, XP kazançları ve oyunlaştırma mantığının doğrulanması.

C. Hibrit Veri Yönetimi ve Veritabanı Katmanı (MySQL & Hive)

Kullanıcı ilerlemelerinin ve sistem verilerinin kararlılığını sağlamak amacıyla projede ilişkisel ve ilişkisel olmayan (NoSQL) veritabanlarının birlikte kullanıldığı hibrit bir mimari tercih edilmiştir:

- **Merkezi Veritabanı (MySQL):** Bulut sunucu üzerinde konumlandırılan ilişkisel veri tabanı, kullanıcıların uzun vadeli ilerleme verilerini, kazanılan toplam deneyim puanlarını (XP), rozet kilitlerini ve sistem metadatalarını saklamaktadır. Backend tarafında veritabanı sorgularının optimize edilmesi ve veri güvenliğinin sağlanması amacıyla nesne-ilişkisel eşleme sağlayan **SQLAlchemy (ORM)** katmanı kullanılmıştır.
- **Yerel Veritabanı (Hive):** Erken çocukluk dönemi eğitim uygulamalarında odak kaybının önlenmesi için kesintisiz bir deneyim sunulması esastır. Bu doğrultuda, internet bağlantısının kesildiği veya zayıf olduğu çevrim dışı (offline) durumlarda çocukların ilerlemelerinin kaybolmaması için cihaz lokalinde çalışan, anahtar-değer (key-value) odaklı ve son derece performanslı NoSQL tabanlı **Hive**

veritabanı konumlandırılmıştır. Ağ bağlantısı yeniden sağlandığında, yerel veriler sunucu tarafındaki MySQL veritabanı ile senkronize edilmektedir.

D. Yapay Zekâ Destekli Ses Analiz Süreci ve "Gör, Dinle, Söyle" Metodolojisi

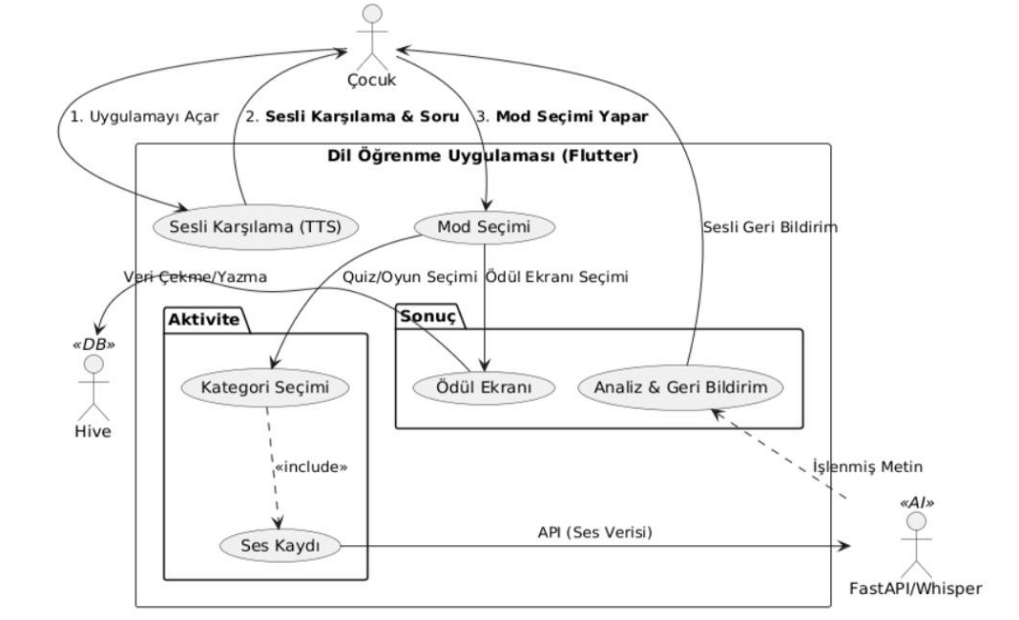
Uygulamanın merkezinde yer alan dil öğretim döngüsü, pedagojik bir yaklaşım olan **"Gör, Dinle, Söyle, Doğruysa İlerle"** iş akışına dayanmaktadır. Bu süreç teknik olarak şu adımlarla işletilmektedir:

1. **Gör ve Dinle:** Çocuk kullanıcı ekranda ilgili nesnenin görselini görür ve sistemin sentezlediği (TTS) doğru İngilizce telaffuzu dinler.
2. **Kayıt ve Transfer:** Çocuk, cihazın mikrofonu aracılığıyla kelimeyi telaffuz eder. Mobil istemci, alınan ses verisini gürültü filtreleme ve model kararlılığı açısından optimize edilmiş **16 kHz WAV** formatında kaydeder ve asenkron olarak backend üzerinde yer alan *POST /speech/evaluate* endpoint'ine iletir.
3. **Yapay Zekâ ile Değerlendirme:** Sunucu tarafında çalışan **OpenAI Whisper** otomatik konuşma tanıma (ASR) modeli, gelen ses verisini metne dönüştürür. Geliştirilen fonetik benzerlik ve niyet analizi (intent analysis) mekanizmaları vasıtasıyla, çocuğun telaffuz doğruluğu analiz edilerek anlık bir başarı skoru hesaplanır ve istemciye geri bildirilir. OpenAI Whisper modeli, çocuk seslerinin yetişkinlere kıyasla gösterdiği akustik değişkenliklere ve yüksek gürültülü ev/sınıf ortamlarına karşı yüksek kararlılık göstermesi nedeniyle seçilmiştir.

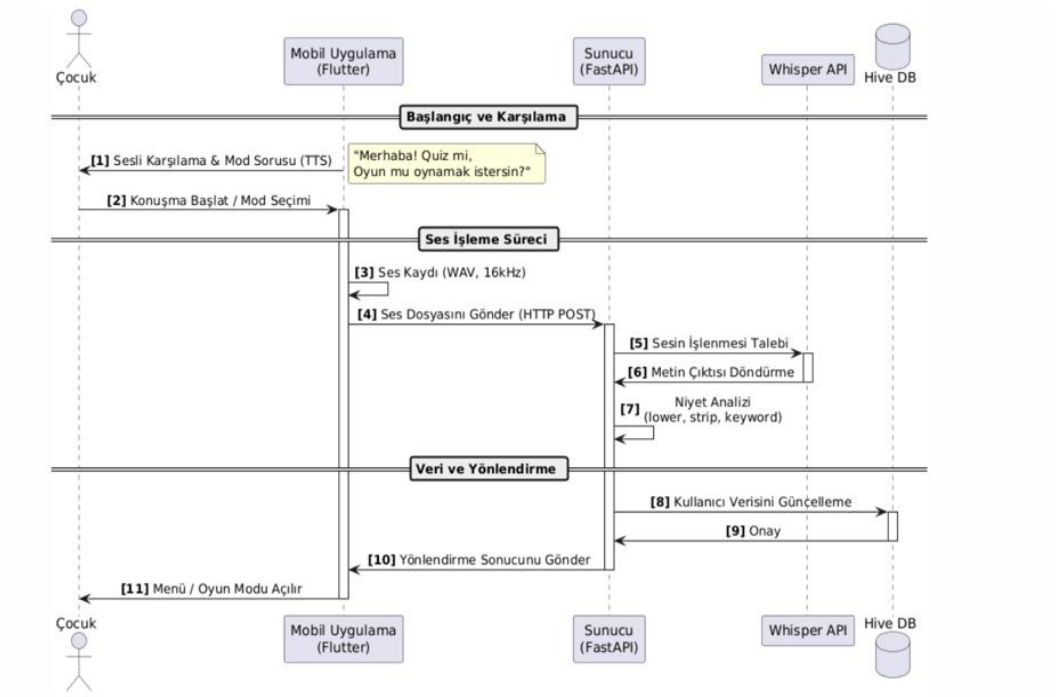
E. Oyunlaştırma (Gamification) Tasarımı ve Motivasyon Motoru

Çocukların yabancı dil öğrenme süreçlerindeki motivasyonlarını sürdürülebilir kılmak amacıyla uygulama içerisine bütünleşik bir oyunlaştırma motoru entegre edilmiştir. Sistemde yer alan etkileşimli modüller şunlardır:

- **Mini Oyunlar (Match, Puzzle, Find):** Çocukların öğrenilen kelimeleri pekiştirmesi amacıyla tasarlanmıştır. Örneğin; parçalara ayrılmış görsellerin çocuk tarafından birleştirilmesiyle çalışan 4'lü yapboz (Puzzle) oyunu tamamlandığında, sistem çocuğun ilgili kelimeyi sesli olarak telaffuz etmesini ister ve döngü tamamlanır.
- **Deneyim Puanı (XP) ve İlerleme Takibi:** Başarıyla tamamlanan her telaffuz pratiği ve oyun sonucunda çocuk anlık olarak XP kazanır. Bu kazançlar arayüzdeki ilerleme çubukları (progress bar) ile görselleştirilerek çocuğun gelişimini somut olarak görmesi sağlanır.
- **Rozet (Badge) Sistemi:** Belirli hedefleri tamamlayan kullanıcılara "Welcome Badge" (Hoş Geldin Rozeti) veya "School Badge" (Okul Rozeti) gibi tematik ödüller sunulmaktadır. Günlük düzenli katılım serileri (streak) ile desteklenen bu yapı, ebeveyn müdahalesine gerek kalmaksızın çocukta sürekli bir öğrenme isteği uyandırmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. Temel kullanım senaryosu (Use-Case)



Şekil 2. Ardışıl düzen(sequence) diyagramı.

III. SONUÇLAR

"Kid's English" mobil uygulaması, laboratuvar simülasyonları, kullanıcı testleri ve işlevsel performans senaryolarından geçirilerek hem sistemsel kararlılık hem de pedagojik çıktıların doğrulanması açısından ampirik olarak değerlendirilmiştir. Proje kapsamında elde edilen sayısal bulgular ve istatistiksel analizler alt başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

A. Telaffuz Doğruluk Eğrisi ve Başarı Bulguları

Sistem üzerinde entegre çalışan yapay zekâ tabanlı ses tanıma ve değerlendirme motoru (POST /speech/evaluate), çocuk kullanıcıların düzenli pratik yapma alışkanlıkları ve telaffuz doğruluk oranları üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan objektif testler ve haftalık başarı eğrisi ölçümleri sonucunda, sesli ve oyunlaştırma tabanlı sistemle etkileşime giren çocukların telaffuz başarı oranlarında ilk haftada **%41 oranında lineer bir artış** gözlemlenmiştir.

Sürecin gün bazlı detayları ve başarı eğrisinin zamana bağlı gelişimi şu şekildedir:

- 1. Gün (%65 Başarı): Yabancı kelimelerin fonetik yapısına, akustik özelliklerine ve mikrofona konuşma pratiğine yeni adapte olan çocukların ortalama telaffuz doğruluk oranı %65 seviyesinde kalmıştır. Bu evredeki hataların temel olarak çocuk seslerindeki fonetik değişkenliklerden ve telaffuz çekincelerinden kaynaklandığı saptanmıştır.
- 4. Gün (Ara Değerlendirme): "Gör, Dinle, Söyle" metodolojisinin sağladığı anlık interaktif geri bildirimler ve sistemin sesli yönlendirmeleri sayesinde çocukların adaptasyon süreci hızlanmış ve başarı oranında düzenli bir yükseliş grafiği yakalanmıştır.
- 7. Gün (%92 Başarı): Düzenli günlük hedefler (streak) ve tekrarlı pratikler sonucunda, birinci haftanın kapanış testlerinde çocukların ortalama telaffuz doğruluk oranı %92 seviyesine ulaşmıştır. Bu bulgu, yapay zekâ destekli ses analizi ve akıllı geri bildirim mekanizmalarının çocuklarda konuşma çekincesini kırmada yüksek başarı gösterdiğini kanıtlamaktadır.

B. Kategori Bazlı Kullanıcı Etkileşimi ve Tamamlama Oranları

Uygulama içerisinde yer alan pedagojik kelime setlerinin ve içerik modüllerinin çocuk kullanıcılar tarafından başarıyla bitirilme oranları istatistiksel olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, kategori bazlı tamamlama oranlarının dağılımı şu şekildedir:

- **Animals (Hayvanlar):** %45'lik bir oranla çocukların en yüksek etkileşim gösterdiği, ilgisini en uzun süre sürdürdüğü ve en hızlı tamamladığı lider kategori olmuştur. Erken çocukluk pedagojisinde

hayvan figürlerinin görsel ve işitsel olarak çocuk motivasyonunu tetiklemedeki gücü bu veriyle doğrulanmıştır.

- **Family (Aile):** Çocukların günlük yaşamlarında, sosyal çevrelerinde doğrudan karşılığı olan ve en sık kullandıkları kelimeleri barındıran bu modül, %30'luk bir tamamlama oranıyla ikinci sırada yer almıştır.
- **School (Okul):** Çocukların kurumsal eğitim alanındaki temel nesneleri kavramasını amaçlayan bu kelime grubu, %15'lik bir tamamlama başarısına ulaşmıştır.
- **Diğer Başlıklar (Objects, City, Country vb.):** Uygulama içerisindeki geri kalan tüm tematik kelime setleri ve modüller ise toplamda %10'luk bir tamamlama payına sahip olmuştur.

C. Altyapı Kararlılığı ve Sistem Performansı Sonuçları

Mühendislik ve yazılım mimarisi perspektifinden yapılan yük ve kararlılık testlerinde şu teknik çıktılar elde edilmiştir:

- **Gecikme Süresi (Latency):** Python tabanlı asenkron FastAPI sunucu katmanı, mikrofondan alınan 16 kHz WAV formatındaki çocuk seslerini OpenAI Whisper modeline aktarma ve fonetik niyet analizi skorunu hesaplama süreçlerinde milisaniyeler bazında yanıt üretmiştir. Bu asenkron hız performansı, dikkat süreleri oldukça kısıtlı olan 4-7 yaş grubu çocukların ekranda bekleme yapmadan akıcı bir deneyim yaşamalarını sağlamıştır.
- **Veri Dayanıklılığı (Hybrid Persistence):** Cihaz lokalinde konumlandırılan NoSQL tabanlı Hive veritabanı, test süreçlerinde simüle edilen anlık ağ kopmalarında ve internet altyapısının tamamen kesildiği durumlarda çocukların kazandığı tüm XP puanlarını, anlık ilerleme barlarını ve kilitli karakter/rozet verilerini sıfır veri kaybı ile korumuştur. İnternet bağlantısı yeniden kurulduğunda, yerel verilerin buluttaki ilişkisel MySQL veritabanına sorunsuz bir şekilde senkronize edildiği ve veri bütünlüğünün tam kararlılıkla korunduğu gözlemlenmiştir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen ampirik ve mimari bulgular, erken çocukluk pedagojisinin temel gereksinimleri ile modern yapay zekâ ve mobil yazılım mühendisliği standartları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Geliştirilen "Kid's English" sisteminin literatüre getirdiği yenilikler, teknik optimizasyonlar ve operasyonel esneklikler aşağıda analitik bir yaklaşımla tartışılmaktadır.

A. Fonetik Değişkenlikler ve OpenAI Whisper Model Kararlılığı

Bulgular bölümünde sunulan ve ilk hafta içinde telaffuz doğruluk oranının %65'ten %92'ye yükselmesini sağlayan doğrulanabilir başarı, doğrudan arka yüz mimarisinde konumlandırılan yapay zekâ entegrasyonunun kararlılığı ile ilişkilidir. Literatürde yer alan geleneksel Konuşma Tanıma (ASR) sistemleri, çoğunlukla yetişkin ses dalgası profilleri, stabil formant frekansları ve düzenli fonetik yapılar üzerine eğitilmiştir [1]. Erken çocukluk dönemindeki (4-7 yaş) çocukların ses karakteristikleri ise yetişkinlere kıyasla daha yüksek bir temel frekansa (F0), kararsız spektral değişkenliklere ve gelişimsel telaffuz kusurlarına sahiptir. Bu durum, standart ASR modellerinde yüksek Kelime Hata Oranı (WER) ve yanlış niyet analizleri doğurmaktadır.

Projede OpenAI Whisper modelinin tercih edilmesi ve mikrofondan alınan verilerin sunucu katmanına aktarılmadan önce **16 kHz WAV** formatında sıkıştırılmadan/optimize edilerek işlenmesi, bu fonetik bariyerin aşılmasında kritik bir rol oynamıştır. Whisper modelinin zayıf denetimli geniş ölçekli veri setleri üzerindeki eğitim altyapısı, çocuk seslerindeki uzatmalara, yutmalara ve hatalı fonem dizilimlerine karşı yüksek bir esneklik sergilemiştir. Ayrıca, ev veya sınıf ortamlarında sıkça karşılaşılan yüksek arka plan gürültülerine (akustik yansımalar, gürültü dalgaları) karşı modelin gösterdiği gürültü direnci, sistemin laboratuvar ortamından bağımsız olarak gerçek dünya senaryolarında da kararlılıkla çalışabileceğini kanıtlamaktadır.

B. Asenkron Performans ve Çocuk-Bilgisayar Etkileşimi (HCI) Standartları

Eğitim teknolojilerinde, özellikle dikkat süreleri (attention span) son derece kısıtlı ve odak dağılımı yüksek olan 4-7 yaş grubu çocuklarda, kullanıcı arayüzü tepki süresi (response latency) pedagojik verimliliği doğrudan etkilemektedir. Geleneksel senkron backend mimarilerinde, ağır bir derin öğrenme modeli olan Whisper'ın ses verisini işlemesi ve geri bildirim üretmesi süreçlerinde yaşanan gecikmeler, çocuk kullanıcılarda motivasyon kırılmasına ve uygulamadan kopmalara yol açmaktadır.

Bu çalışmada arka yüz katmanı için **FastAPI** framework'ünün seçilmesi ve *POST /speech/evaluate* servisinin asenkron (async/await) yapıda kurgulanması, veri transferi ve model işleme kuyruklarındaki

tıkanmaları engellemiştir. İstemci ile sunucu arasındaki RESTful JSON takasının milisaniyeler seviyesine indirilmesi, çocuğun kelimeyi söylediği an ile ekranda oyunlaştırma ödülünü (XP, rozet veya yapboz parçası) gördüğü an arasındaki bağı kuvvetlendirmiştir. Bu durum, Çocuk-Bilgisayar Etkileşimi (HCI) ilkelerinde yer alan "anlık pozitif pekiştirme" (immediate positive reinforcement) kuralını başarıyla yerine getirmektedir.

C. Metin Bariyerinin Aşılması ve Pedagojik Bağımsızlık

Mevcut mobil dil öğretim uygulamalarının en büyük metodolojik sınırlılığı, hedef kitlesi okuma-yazma bilmeyen çocuklar olsa dahi menü navigasyonlarında, komut butonlarında ve yönlendirmelerde metin tabanlı (Text-centric) yapılara yer vermeleridir. Bu durum, çocuğu dijital öğrenme sürecinde sürekli bir ebeveyn desteğine bağımlı kılmakta, bağımsız keşif duygusunu zedelemekte ve nihayetinde düşük motivasyona neden olmaktadır.

"Kid's English" projesinde kurgulanan tamamen sesli giriş ekranı (Voice Entry Screen) ve lobi nvigasyonu, çocuğun sadece konuşarak ve işitsel/görsel simgeleri takip ederek platformda özgürce gezinebilmesini sağlamıştır. "Gör, Dinle, Söyle, Doğruysa İlerle" iş akışı, çocuk psikolojisindeki taklit ve oyun tabanlı öğrenme dürtülerini tetiklemektedir. İstatistiklerde Animals (Hayvanlar) kategorisinin %45'lik bir tamamlama oranıyla lider olması, soyut kavramlar yerine çocuk dünyasında somut karşılığı olan görsel ve fonetik ögelerin seçilmesinin pedagojik doğruluğunu desteklemektedir.

D. Hibrit Veri Mimarisi ve Çevrim Dışı (Offline) Sürdürülebilirlik

Geliştirilen sistemin bir diğer güçlü yönü, bulut tabanlı ilişkisel **MySQL** veritabanı ile cihaz lokalinde çalışan NoSQL tabanlı **Hive** veritabanının hibrit entegrasyonudur (Hybrid Persistence). Literatürdeki birçok eğitim uygulaması, internet bağlantısı koptuğu anda kullanıcı oturumunu sonlandırmakta veya ilerleme verilerini kaydetmeyi durdurmaktadır.

Hive veritabanının Dart diliyle yazılmış saf, hafif ve yüksek hızlı yapısı, anlık ağ kopmaları simülasyonlarında çocukların kazandığı XP puanlarının ve rozet koleksiyonlarının yerelde güvenle önbelleğe alınmasını (caching) sağlamıştır. Bu sayede, internet altyapısının zayıf olduğu kırsal bölgelerde veya hareket halindeki mobil senaryolarda dahi çocuk kesintisiz bir oyunlaştırma deneyimi yaşamaktadır. Ağ bağlantısı sağlandığı anda SQLAlchemy ORM katmanı üzerinden MySQL ile yapılan asenkron senkronizasyon, veri bütünlüğünü bozmadan arka planda tamamlanmaktadır. Bu mimari yapı, uygulamanın teknik ve operasyonel açıdan sürdürülebilir bir mühendislik ürünü olduğunu ortaya koymaktadır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında; okuma-yazma bilmeyen 4-7 yaş grubu çocukların yabancı dil öğrenme süreçlerinde karşılaştıkları en büyük yapısal engellerden olan "metin bariyeri" ve "ebeveyne bağımlılık" sorunlarını bütüncül bir yaklaşımla ortadan kaldıran, sesli komut destekli yapay zekâ entegrasyonlu modern bir mobil yazılım mimarisi başarıyla geliştirilmiştir. Proje; ön yüzde Flutter ve Dart programlama dilinin esnek kullanıcı arayüzü (UI) yeteneklerini, arka yüzde ise FastAPI framework'ünün yüksek performanslı asenkron işlem gücünü bir araya getirerek uçtan uca kararlı bir istemci-sunucu (Client-Server) altyapısı sunmaktadır.

Uygulamanın merkezinde yer alan "Gör, Dinle, Söyle" metodolojisi, çocukları geleneksel eğitim yazılımlarının getirdiği pasif içerik tüketicisi rolünden çıkararak telaffuz odaklı interaktif geri bildirim alan sürecin aktif birer öznesi haline getirmiştir. Geliştirilen POST /speech/evaluate servis mimarisi ve OpenAI Whisper model entegrasyonu sayesinde, çocuk seslerinin akustik ve fonetik değişkenliklerine rağmen yüksek gürültülü gerçek dünya ortamlarında dahi %92'ye varan bir telaffuz analiz doğruluğu elde edilmiştir. Bu kararlı yapay zekâ altyapısının, çocukların hedef dil üzerindeki konuşma çekincelerini kırmada ve telaffuz başarı oranlarında sadece bir hafta gibi kısa bir sürede %41'lik lineer bir artış sağlamada güçlü bir katalizör olduğu ampirik olarak kanıtlanmıştır.

Teknik kararlılık ve sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, projede kurgulanan hibrit veri yönetimi (MySQL ve Hive NoSQL entegrasyonu), mobil eğitim teknolojilerinde çevrim dışı (offline) çalışabilirlik adına güçlü bir referans teşkil etmektedir. Cihaz lokalinde çalışan Hive veritabanının anlık ağ kopmalarında sağladığı sıfır veri kaybı güvencesi, çocukların kazandığı deneyim puanlarının (XP) ve rozet koleksiyonu gibi oyunlaştırma bileşenlerinin pedagojik kesintisizliğini garanti altına almıştır. Sonuç olarak "Kid's English" projesi; ses işleme (AI), oyunlaştırma (Gamification) ve dayanıklı veri mimarisini (Hybrid Persistence) başarıyla birleştiren, Çocuk-Bilgisayar Etkileşimi (HCI) standartlarına uygun yenilikçi bir mühendislik çözümü olarak literatürdeki yerini almıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi bünyesinde yürütülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] A. Radford, J. W. Kim, T. Xu, G. Brockman, C. McLeavey, and I. Sutskever, "Robust speech recognition via large-scale weak supervision," arXiv preprint arXiv:2212.04356, 2022. (OpenAI Whisper modeli için temel akademik referans)

[2] J. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, and L. Nacke, "From game design elements to gamefulness: defining gamification," in Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, 2011, pp. 9–15. (Oyunlaştırma (XP, Rozet) pedagojisi için temel referans)

[3] J. P. Hourcade, Child-Computer Interaction, 1st ed. Iowa City, IA: Creaspace, 2008. (4-7 yaş grubu Çocuk-Bilgisayar Etkileşimi ve arayüz bağımsızlığı standartları referansı)

[4] M. Benzeghiba, R. De Mori, O. Deroo, S. Dupont, T. Erbes, D. Jouvet, L. Fissore, P. Laface, and A. Mertins, "Automatic speech recognition and speech variability: A review," Speech Communication, vol. 49, no. 10-11, pp. 763–786, 2007. (Çocuk seslerindeki fonetik ve akustik değişkenliklerin ASR üzerindeki etkileri referansı)

[5] Python Software Foundation, "FastAPI Framework: High performance, easy to learn, fast to code, ready for production," 2024. [Online]. Available: https://fastapi.tiangolo.com/. [Accessed: May 15, 2026].

[6] Google Language Team, "Flutter API Reference: Multi-platform mobile application development framework," 2024. [Online]. Available: https://docs.flutter.dev/. [Accessed: May 15, 2026].

[7] Hive Community, "Hive package documentation: Lightweight and blazing fast key-value database written in pure Dart," 2024. [Online]. Available: https://pub.dev/packages/hive. [Accessed: May 15, 2026]. (Yerel NoSQL veritabanı mimarisi referansı)

[8] Oracle Corporation, "MySQL Reference Manual: Relational Database Management System," 2024. [Online]. Available: https://dev.mysql.com/doc/. [Accessed: May 15, 2026]. (Merkezi bulut veritabanı katmanı referansı)

[9] M. Bayer, "SQLAlchemy: Python SQL Toolkit and Object Relational Mapper," in Proceedings of the United States PyCon Conference, 2012. (Backend veri senkronizasyonu ve ORM katmanı referansı)

[10] F. He, "A study on the audio recording standards for automated pronunciation evaluation systems," Journal of Educational Technology Development and Exchange, vol. 14, no. 1, pp. 45–58, 2021. (Ses verilerinin 16 kHz WAV formatında işlenmesi ve akustik optimizasyon referansı)

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Fingerprinting Yöntemi ile BLE Beacon ve RFID Tabanlı Hibrit Kapalı Alan Navigasyon Sisteminin Simülasyon Tabanlı Geliştirilmesi

İlayda Selçuk, Hasan Demir, Atıl Emre Coşgun*

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Aksaray/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** atilemrecosgun@aksaray.edu.tr

ÖZET

Açık alanlar için kullanılan GNSS (Global Navigasyon Uydu Sistemleri) sinyallerinin kapalı alanlarda da kullanılması ile zayıflayan sinyal gücü konum belirlemede önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada BLE beacon ve aktif RFID teknolojileri birleştirilerek hibrit bir kapalı alan navigasyon sistemi önerilmiştir. Bu önerilen sistemde fingerprinting yöntemi de kullanılarak RSSI değerlerine dayanan bir parmak izi veri tabanı oluşturulmuştur. Fingerprinting yönteminin çevrimiçi aşamasında elde edilen sinyal değerleri ile bu veri tabanındaki veriler ile karşılaştırılarak anlık konum tahmini yapılmıştır. Önerilen sistem Unreal Engine tabanlı bir simülasyon ortamında simüle edilmiş ve navigasyon performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile kapalı alan navigasyon sistemlerinin doğruluğunun önerilen sistem ile arttırılacağı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, sistemde RFID etiketlerinin kullanılması kritik noktalarda konum doğruluğunu artırarak hata payını azaltmayı hedeflemektedir. Simülasyon ortamında farklı senaryoların test edilmesi, sistem performansının gerçek uygulama öncesinde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca geliştirilen yapı, sesli yönlendirme desteği ile kullanıcı dostu bir deneyim sunmayı amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, özellikle karmaşık kapalı alanlarda güvenilir ve erişilebilir navigasyon çözümleri geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *BLE beacon, Fingerprinting yöntemi, Kapalı alan konumlandırma, Navigasyon sistemi, RFID.*

Simulation-Based Development of a Hybrid Indoor Navigation System Combining BLE Beacons and RFID Using the Fingerprinting Method

ABSTRACT

The use of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) signals, typically employed in open areas, within indoor environments presents a significant challenge due to the attenuation of signal strength during positioning. In this study, a hybrid indoor navigation system is proposed by combining BLE beacon and active RFID technologies. In this proposed system, a fingerprint database based on RSSI values has been created using the fingerprinting method. Real-time position estimation was performed by comparing the signal values obtained during the online phase of the fingerprinting method with the data in this database. The proposed system was simulated in an Unreal Engine-based simulation environment, and its navigation performance was tested. The results indicate that the accuracy of indoor navigation systems can be improved using the proposed system. Furthermore, the use of RFID tags in the system aims to enhance positional accuracy at critical points and reduce the margin of error. Testing various scenarios in the simulation environment has enabled the evaluation of system performance prior to real-world implementation. Furthermore, the developed system aims to provide a user-friendly experience with voice guidance support. In this respect, the study contributes to the development of reliable and accessible navigation solutions, particularly in complex indoor environments.

Keywords: *BLE beacon, Fingerprinting method, Indoor positioning, Navigation system, RFID.*

I. GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinin gelişmesiyle beraber, sosyal ve profesyonel yaşamın her aşamasında yaşamı kolaylaştıran uygulamalar geliştirilmekte ve bu durum toplumda önemli avantajlar sunmaktadır [1]. Bu uygulamalar arasında en önemlilerden biriside konum bulmaya yarayan navigasyon uygulamalarıdır.

Hayatın olağan akışında, gün içindeki yoğunluk nedeniyle açık ve kapalı alanlarda yön bulma ihtiyacı artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanması ve doğru bir şekilde yönlendirilmesi için navigasyon tasarımının önemi giderek artmaktadır [2]. Bu tasarım yapılırken, dikkat edilmesi gereken en önemli şey, herkes tarafından hızlı ve kolay anlaşılabilir bir sistem olmasıdır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan navigasyon sistemleri, açık alanlarda kullanıcı konumunu Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (Global Navigasyon Uydu Sistemleri - GNSS) aracılığıyla belirlemektedir [3]. GNSS teknolojisi konum belirlemede oldukça başarılıdır ama bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan biriside, GNSS sinyallerinin iç mekanlarda çatı, duvar gibi engeller sebebiyle büyük oranda kaybolduğu, yansıdığı ve sinyal gücünün düşmesiyle verimli çalışmamasıdır [4]. Bu nedenle kapalı alanlarda konum belirlenmesi için alternatif çözümler geliştirilmektedir. Bluetooth tabanlı Beacon teknolojisi, Wi-Fi tabanlı sistemler, RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) uygulamaları, karekod temelli çözümler ve pusula ile adımsayar gibi bileşenler, birleştirici hibrit sistemler bu alternatifler arasında yer almaktadır [5].

RFID (Radyo frekansı ile tanımlama) teknolojisi, radyo frekansları üzerinden etiketlerdeki veriyi kablosuz olarak okuyup yazmamızı ve böylece nesneleri otomatik olarak tanımlayıp takip edebilmemizi sağlayan bir sistemdir [6]. RFID'ın en önemli özelliklerinden biriside okuyucu ve etiketlerin doğrudan görüş hattında iletişim kurabilmesi, bu sayede kapalı alanların yönetilmesinin kolaylaştırılmasıdır. Ayrıca RFID teknolojisi aynı anda birden fazla etiketin okunabilmesine olanak tanıyarak verimliliği artırmaktadır [3].

Bu teknolojilerin yanı sıra, kapalı alan konumlandırma sistemlerde kullanılan trilaterasyon, üçgenleme, fingerprinting, proximity gibi bazı yöntemlerde mevcuttur.

Üçgenleme yöntemi en yaygın ve en basit konumlandırma sistemi yöntemidir. Basit hesaplama alt yapısı sayesinde düşük maliyet sunar bu da yöntemi avantajlı kılmaktadır [7]. Bu yöntem konumu belirlenecek nesnenin yerini bulmak için, üç adet sinyal yayan cihazdan bu nesnenin açılarını ve cihazların birbirine olan mesafelerini ölçerek açı-kenar-açı (AKA) teorimiyle yaklaşık konumu hesaplayabilmektedir.

Trilaterasyon yöntemi, iç ve dış mekan konumlandırma da kullanılan yöntemlerden birisidir. GPS (Global Yer Tanımlama Sistemi) Uyduları ile yapılan konum belirleme trilaterasyon yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntem kullanılan referans noktalarına, koordinat bilinirliğine göre değişmektedir [8]. Trilaterasyon yönteminde, nesnenin konumu en az konumu bilinen üç referans noktasına dayanarak mesafe ölçümüyle bulunur. Bu yöntem, sadece mesafeyle çalışır açı bilgisine gerek duyulmamaktadır.

Proximity (yakınlık) yönteminde, nesnelerin veya kişilerin yerlerini tahmin edebilmek için koordinatları bilinen referans noktaları kullanılır. Konumu bulunmak istenen nesnelerin veya kişiler vericiler ile bağlantı kurduğunda belirlenen konumda veya yakınında olduğu kabul edilir. Bu yöntemle kesin bir nokta belirlenemez, sadece nesnenin belirli bir noktaya olan yakınlığını tahmin edilebilir [9].

Fingerprinting (parmak izi) yöntemi, kapalı alanlarda kablosuz cihazların yaydığı sinyal gücü (RSSI) değerlerini ölçerek konum tahmini yapan bir tekniktir. Bu yöntem çevrimdışı (öğrenme) ve çevrimiççi (konum tahmini) olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Çevrimdışı aşamada, ortamdaki noktaların sinyal güçleri ölçülerek her bir referans nokta ile konum bilgisi veri tabanına kaydedilir ve bu kayıtlara parmak izi denilmektedir. Çevrimiçi aşamada ise, kullanıcının cihazından alınan gerçek zamanlı sinyal verileri ile veri tabanındaki veriler karşılaştırılarak konum tahmini yapılır. Bu iki aşama sayesinde, düşük maliyetli ve mevcut teknolojiyle uyumlu çalışmaktadır [10].

Yaya Ölü Hesaplama (Pedestrian Dead Reckoning-PDR) yönteminde, GPS'in yetersiz kaldığı kapalı alanlarda, ivmeölçer, jiroskop, manyetometre gibi sesnörlerin kullanıldığı bir konumlandırma yöntemidir. Wİ-Fİ veya BLE (bluetooth) gibi teknolojileri kullanır. Kullanıcı yürüdükçe, telefon sensörleri tarafından adımlar algılanır ve her adımın uzunluğu kişinin boyuna ve yürüme hızına göre tahmin edilir. Pusulayla da yön bilgisi sağlanır. Bu veriler birleştirilerek kişinin konumu anlık olarak güncellenir [11].

Hibrit veri füzyonu, birden fazla sensörden gelen verileri toplayarak birlikte değerlendirir. Tek bir sensöre karar vermek yerine daha doğru bir sonuç elde etmek için kullanılmaktadır. Farklı sensörlerden gelen verilerin toplanıp birlikte karar verilmesi sayesinde ortam daha iyi anlaşılabilir ve sağlıklı kararlar verilebilir. Bu sayede karmaşık ortamlarda sistem hatasını azaltır ve performansını iyileştirir. Bu yöntem sayesinde, kapalı alanlarda daha doğru, hassas, güvenilir ve kesintisiz bir konum tahmini yapılabilir [12].

Makine öğrenimi (ML) modeli, Wİ-Fİ, BLE, manyetik alan, PDR, görüntü işleme gibi farklı veri kaynaklarının birleştirilmesiyle kapalı alan konumlandırma da kullanılmkatadır. Makine öğrenim teknikleri veriler arasında karmaşık yapı ve örüntüyü tespit etmekte başarılı olduklarından dolayı ortamda bulunan RSSI değerlerindeki değişimleri kolayca ayırt edebilirler. Bu yöntem kullanılarak yapılan konumlandırma sistemleri geleneksel yöntemlere göre daha doğru tahmin yeteneğine sahiptir [13].

Derin öğrenme yöntemleri, konumlandırma sistemlerinde konum tahmini performansını önemli ölçüde arttırmaktadır [14]. Özellikle kapalı alan konumlandırma sistemlerinde Wİ-Fİ sinyalleri ve BLE beacon ile birlikte kullanılan derin öğrenme yöntemleri gelen ham verileri direkt işleyere daha hassas ve güvenilir konum tahmini yapabilir [9], [15]. MLP (Çok Katmanlı Algılayıcı), CNN (Evrişimli Sinir Ağları) ve LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek), GRU (Geçitli Tekrarlayan Birim) gibi farklı ağ yapıları, sinyal gücü ve hareket verilerini etkin şekilde değerlendirirken, sensör füzyonu yaklaşımları birden fazla sensörden alınan bilgileri birleştirerek konum hatalarını azaltmakta ve sistemin güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada önerilen BLE beacon ve aktif RFID destekli kapalı alan navigasyon sistemi, gerçek ortamd kurulmadan önce Unreal Engine tabanlı simülasyon ortamında modellenmiş ve performans analizi gerçekleştirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

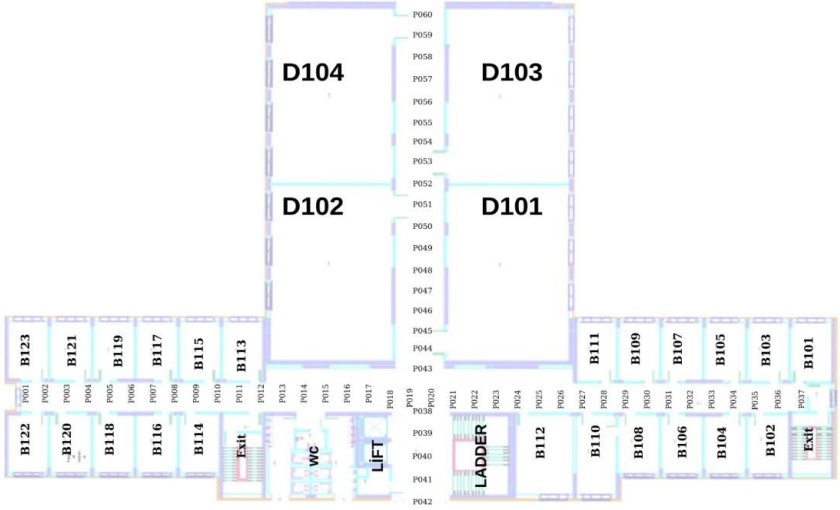
A. *II.I. Çalışma Alanı*

Uygulama alanı olarak Şekil. 1'de gözüken Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi seçilmiştir.



Şekil 1. Çalışma için belirlenen kapalı alan

Uygulama aşamasına geçilmeden önce kullanılacak cihazlarının konumlandırma için testleri simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu test aşaması navigasyon uygulamasının ön aşaması olmuştur ve cihazların nasıl çalıştığı hakkında gözlem yapılmasını sağlamıştır. Test aşaması, mühendislik fakültesinin 1. Katında, akademisyen odalarının bulunduğu koridor ve dersliklerin bulunduğu koridor boyunca Şekil. 2'de de görüldüğü üzere tamamen kapalı alanda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Test alanı

B. *II.II. Kullanılan Donanım Bileşenleri*

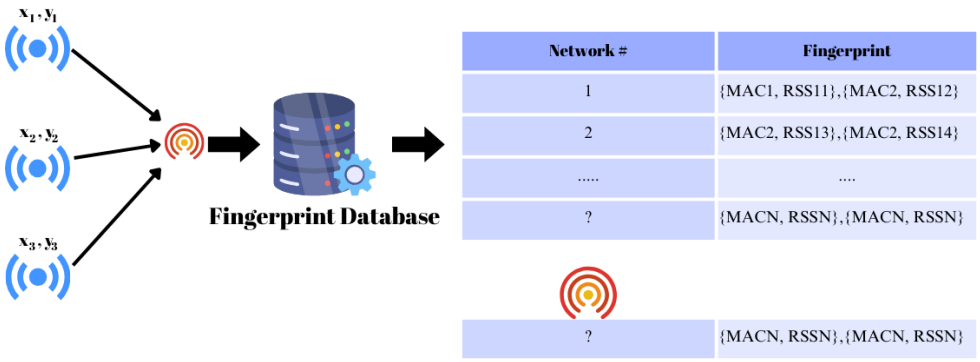
Bu çalışmada kapalı alan konumlandırma simülasyonu yapmak amacıyla Bluetooth Low Energy (BLE) tabanlı Beacon cihazları ile aktif RFID etiketler simülasyon ortamında birlikte modellenmiştir. Gerçek donanım kurulumu yerine, beacon ve RFID sinyal yayımları matematiksel modeller kullanılarak temsil edilmiştir.

Simülasyon ortamında beaconlar, çalışma alanı içerisinde belirlenen referans noktalarına sanal olarak konumlandırılmış ve belirli parametreler ile sürekli BLE sinyali yayıyormuş gibi modellenmiştir. Unreal Engine'da bu BLE beacon cihazlardan sinyal alabilmek için BLE Utilities V2 eklentisi kullanılmıştır. Bu alınan sinyallerden elde edilen RSSI (Received Signal Strength Indicator) değerleri, kapalı alan konumlnadırma sistemlerinde kullanılan fingerprinting yönteminin temel girdisi olmuştur.

Sistemde aktif RFID etiketler de benzer şekilde sanal ortamda temsil edilmiştir. Aktif RFID etiketlerin belirli alanda sinyal algılama davranışı modellenmiştir ve kullanıcı bu kapsama alanına girdiğinde konum bilgisinin güncellenmesi sağlanmıştır. Bu sayede, fingerprinting yöntemi ile elde edilen konum tahmininin kritik noktalarda doğru konum tahmini yapması amaçlanmıştır. Bu simülasyon tasarımı ile, sinyal zayıflamasının ve yansımasının yoğun olduğu kapalı alanlarda konum belirleme güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

C. *II.III. Fingerprinting Yöntemi*

Bu çalışmada konum belirleme yöntemi olarak Şekil. 3'de gösterilen, fingerprinting yöntemi kullanılmıştır. Fingerprinting yöntemi, çevrimdışı yani eğitim aşaması ve çevrimiçi yani konum tahmini aşaması olarak iki aşamadan oluşmaktadır [10].



Şekil 3. Fingerprinting yöntemi

Çevrimdışı aşamada, çalışma alanı referans noktalara bölünmüştür ve her bir referans noktası için BLE beaconlar simülasyon ortamında sanal olarak konumlandırılmıştır. Her referans noktası için elde edilen RSSI değerleri ölçülerek parmak izi veri tabanı oluşturulmuştur. Bu aşamada, ortamın genel sinyal yapısının öğrenilmesi sağlanmaktadır.

Çevrimiçi aşamada ise, kullanıcının anlık konumuna karşılık gelen RSSI değerleri, çevrimdışı aşamada veri tabanına parmak izi olarak kaydedilen değerler ile karşılaştırma yapılarak kullanıcın konumu tahmin edilmektedir. Benzerlik ölçümü için ise aşağıda bulunan Öklid mesafesi yöntemi kullanılmıştır.

$$d_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \left(m_k - r_{i,k}\right)^2} \tag{1}$$

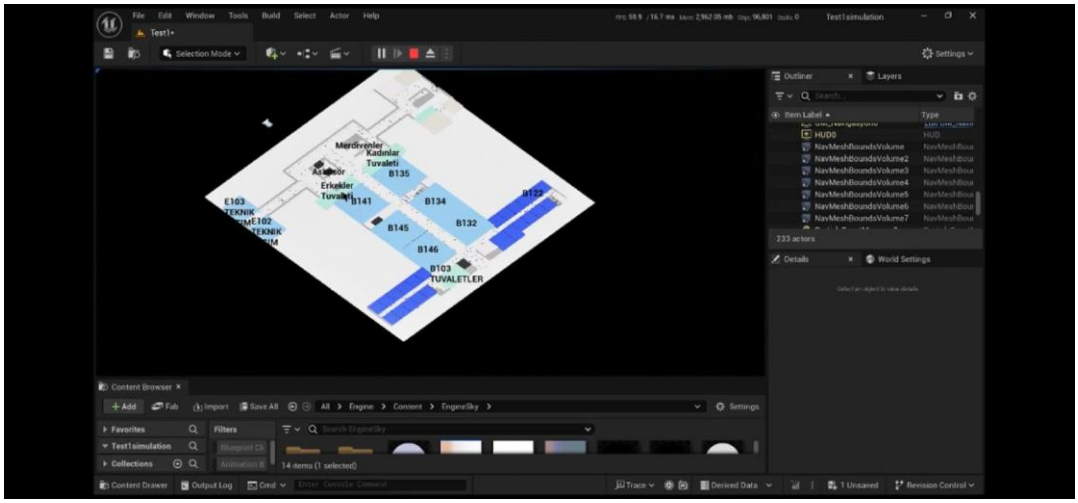
Buna ek olarak, sistemde aktif RFID etiketler de simülasyon ortamında belirli alanlara modellenmiştir ve bu sayede fingerprinting yönteminden elde edilen konum bilgisinin doğruluğu arttırılmıştır. Kullanıcı sanal ortamda bir aktif RFID etiketlerinin bulunduğu alana giriş yaptığında sistem konum bilgisini güncellemesiyle daha doğru konum tahmini yapmayı amaçlamaktadır. Bu RFID etiketleri sayesinde, sistemin hatasının en aza indirilmesi ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

D. *II.IV. Simülasyon Ortamı Ve Navigasyon Uygulaması*

Bu çalışmada önerilen hibrit kapalı alan navigasyon sistemi, gerçek ortam kurulumu yapılmadan önce sistem performansını değerlendirebilmek amacıyla oyun tasarımı, film sektörü, simülasyon sektörlerinde kullanılan Unreal Engine oyun motoru kullanılarak simülasyon ortamında test edilmiştir. Unreal Engine

platformu, üç boyutlu modelleme, fiziksel ortam oluşturma ve navigasyon altyapısı sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

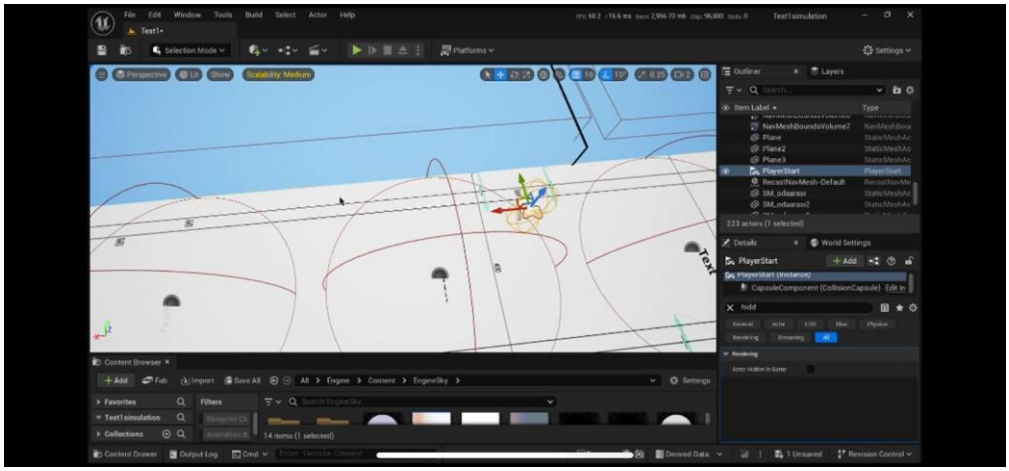
Çalışma alanının kat planı Şekil. 4'de gösterildiği gibi Unreal Engine ortamına aktarılmış ve koridorlar, sınıflar, merdivenler ve ortak kullanım alanları üç boyutlu olarak modellenmiştir. Ortam içerisinde yürünebilir alanların belirlenmesi amacıyla Unreal Engine'nin NavMesh (Navigation Mesh) altyapısı kullanılmıştır. NavMesh sistemi sayesinde kullanıcının yalnızca erişimin mümkün olduğu alanlarda hareket etmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.Unreal Engine ortamında oluşturulan kapalı alanın üç boyutlu genel görünümü

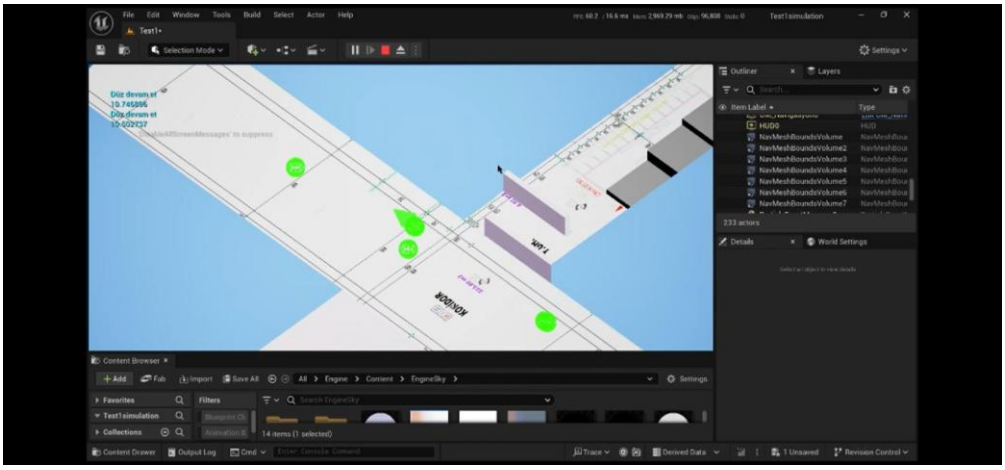
Kullanıcıyı temsil eden sanal karakter üzerine ise navigasyon sistemi entegre edilmiştir ki bu sayede, kullanıcının mevcut konumu ile hedef konum arasındaki en kısa yolu otomatik olarak hesaplayarak rota oluşturulması sağlanmaktadır. Böylece fingerprinting yöntemi ile tahmin edilen konum bilgisi, navigasyon sistemine entegre edilmiştir ve hedef noktaya yönlendirme gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon ortamında Şekil. 5'de görüldüğü üzere BLE beacon sinyalleri matematiksel bir model ile temsil edilmiştir.



Şekil 5. Simülasyon ortamında beacon kapsama alanlarının ve navigasyon altyapısının gösterimi

Çevrimdışı aşamada oluşturulan parmak izi veri tabanı kullanılarak, çevrimiçi aşamada elde edilen RSSI değerleri karşılaştırılmıştır ve kullanıcının tahmini konumu belirlenmiştir. Elde edilen konum bilgisi Şekil. 6'da ki gibi Unreal Engine ortamında anlık olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 6. Gerçek zamanlı konum tahmini ve yönlendirme arayüzü

Ayrıca bu sistem, konum bulmada zorluk çeken ve görme engelli bireyler için istenilen konuma ulaşılımı kolaylaştırmak amacıyla sesli yönlendirme modülü ile desteklenmiştir. Kullanıcının mevcut yönü ile hedef yönü arasındaki fark hesaplayarak "sağa dön", "sola dön", "düz devam et" ve "hedefe ulaştınız" gibi sesli komutlar üretilmiştir. Bu komutlar Unreal Engine ortamında ses bileşenleri kullanılarak kullanıcıya iletilmiştir.

Aynı zamanda bu sistemde, Unreal Engine ortamında kullanıcı sesli komutta verebilmektedir. Bu da Speech To Life eklentisi kullanılarak sağlanmıştır. Kullanıcının sesli komutları mikrofon sayesinde algılanıp navigasyon sistemi ile entegre edilmiştir.

Simülasyon ortamında beacon yerleşim senaryosu ve sinyal gücü durumları test edilmiştir. Fingerprinting ve aktif RFID destekli sistemin konum doğruluğu analiz edilmiştir. Böylece gerçek ortam uygulamasına geçmeden önce sistem performansı değerlendirilmiştir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kapalı alanlarda güvenli ve doğru konum tahmini yapmak amacıyla BLE beacon ve RFID kullanılan hibrit bir navigasyon sistemi önerilmiştir. Bu önerilen sistemde, konum tahmini fingerprinting yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiştir. RFID etiketleri sayesinde ise konum doğruluğu arttırılmıştır.

Gerçek donanım kurulumu yapılmadan önce sistem performansını değerlendirmek için Unreal Engine tabanlı üç boyutlu ortamda simülasyon uygulaması yapılmıştır. Bu ortamda gerçek donanım kurulumunda kullanılacak teknolojilerin yerleşimi matematiksel modeller ile temsil edilmiştir ve sinyal yayılımı değerlendirilmiştir. Bu sayede de önerilen sistemin kapalı alanda yüksek doğruluk ve daha güvvenilir şekilde çalışacağı gözlemlenmiştir.

Ayrıca geliştirilen simülasyon sistemi sesli komut ve yönlendirme modülü ile de desteklenmiştir. Bu sayede konum bulmada zorluk çeken bireyler ve hatta görme engelli bireyler için kapalı alanda bağımsız hareket etmelerine katkı sağlanmış olacaktır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen sistemin gerçek donanım ile uygulanması, farklı bina ve ortamlarda test edilmesi ve farklı konum tahmini yöntemleri ile konum doğruluğunun arttırılması hedeflenmektedir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada BLE beacon ve RFID etiketlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir navigasyon sistemi önerilmiştir ve Unreal Engine tabanlı bir simülasyon ortamında simüle edilmiştir. Bu simülasyon uygulamasında fingerprinting yöntemi kullanılarak konum tahmini doğruluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle kapalı alanlarda sinyal zayıflaması ve yansıması gibi sorunların konum tahminini oldukça fazla etkilediği bilinmektedir. İşte bu alanlarda, önerdiğimiz bu sistem konum doğruluğunu etkileyen bu sorunları azalttığı gözlemlenmiştir.

Literatürde Wİ-Fİ, BLE beacon, RFID gibi sistemlerin konum tahmininde kullanıldığı görülmektedir. Ancak tek bir teknoloji kullanılan bu çalışmalarda sinyal gücü çevresel faktörlerden oldukça kolay etkilenmektedir. Önerilen bu hibrit sistem, fingerprinting yönteminin desteği, BLE beacon ve RFID etiketlerinin birlikte kullanılmasıyla daha güvenilir bir konum tahmini vermektedir.

Aynı zamanda çalışmanın simülasyon ortamında yapılmasının bir sınırlılık olduğunun ve gerçek ortamda sinyal gücünün çevresel faktörler, insan yoğunluğu gibi durumlardan etkilenmesiyle sistem performansının düşeceğinin farkında olarak gelecek çalışmalarda sistemin gerçek donanım ile uygulanıp, farklı ortamlarda test edilmesi önerilmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışmada BLE beacon ve RFID etiketleri kullanılarak hibrit bir kapalı alan konumlandırma sistemi önerilmiştir ve Unreal Engine tabanlı bir simülasyon ortamında simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fingerprinting yöntemi ile yapılan konum tahmininin RFID etiketleri ile doğruluğunun arttığı gözlemlenmiştir.

Önerilen bu sistem ile özellikle karmaşık alanlarda daha güvenilir konum tahmini yapan uygulamaların geliştirilmesinde büyük katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışma, sesli yönlendirme modülünün eklenmesi ile de görme engelli bireyler başta olmak üzere konum bulmada zorluk çeken bireyler için kullanışlı bir navigasyon sistemi geliştirilmesinin ilk adımı olmuştur.

ACKNOWLEDGEMENTS

Bu çalışma, TÜSEB tarafından desteklenen B Grubu Proje Destek Programı kapsamında 47269 numaralı TÜSEB projesinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] A. Baydur, A. O. Altınay, ve A. Tunçer, *Engelsiz Bilişim 2021*, 1. Baskı. Kriter Yayınevi, 2021.

[2] B. Çeken ve Y. Balci, "İç Mekan Yönlendirme Tasarımlarında Mobil Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarının Kullanımı", c. 13, sy 2, 2013.

[3] E. Demiral, İ. R. Karaş, ve M. K. Turan, "RFID Sistemleri ile Konum Belirleme Uygulamaları", May. 2013.

[4] B. N. Özdemir, A. Ceylan, S. Alçay, ve C. Ö. Yiğit, "Kapalı Mekanlarda Uygulanan Konum Belirleme Yöntemleri Ve Karşılaştırılması", 2014.

[5] O. Eroğlu ve M. Doğan, "Konum Tabanlı Hizmetler, Bluetooth Tabanlı İç Mekan Konumlandırma Hizmeti, Antalya İli Örneği", Eki. 2019.

[6] F. Maraşli ve M. Çibuk, "RFID Teknolojisi ve Kullanım Alanları", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, c. 4, sy 2, Ara. 2015, doi: 10.17798/beufen.19847.

[7] R. Çakır ve S. Doğanalp, "Beacon Tabanlı Mesafe Bilgisinin Ortam Şartlarına Göre Belirlenerek Üçgenleme Algoritmasıyla Test Edilmesi", *Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng.*, c. 24, sy 3, ss. 650-659, Haz. 2024, doi: 10.35414/akufemubid.1389005.

[8] Ş. Yaman, K. Gündoğdu, ve A. Çalhan, "Yeni Bir İç Mekân Konum Bulma Sistemi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknol. Derg.*, c. 9, sy 2, ss. 636-645, Nis. 2021, doi: 10.29130/dubited.747445.

[9] R. Çakır, M. Tanrıverdi, B. Sarıkaya, F. Şentürk, ve S. Doğanalp, "Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Navigasyon Uygulaması", *Mühendis. Bilim. Ve Tasar. Derg.*, c. 12, sy 1, ss. 118-131, Mar. 2024, doi: 10.21923/jesd.1271498.

[10] Isil Karabey, "Indoor Localization Using WI-FI Fingerprinting Technique", 2015, *Unpublished*. doi: 10.13140/RG.2.1.3567.5128.

[11] L. Bayındır ve I. Karabey, "Yaya Parakete Hesabında Kullanılan Adım Tespit Ve Adım Uzunluğu Tahmin Yöntemlerinin Bir Değerlendirilmesi", Kas. 2014.

[12] B. Çengiz ve R. Daş, "Veri Füzyonu: Veri Kaynakları, Mimariler, Zorluklar ve Çözüm Yaklaşımları", 2022.

[13] P. Yildirim Taşer ve V. Akram, "Kapalı Ortamlarda Gerçek Zamanlı Kişi Tespitinde Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılaştırmalı Başarım Analizi", *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, c. 9, sy 1, ss. 182-193, Oca. 2021, doi: 10.21541/apjes.765795.

[14] N. F. Bar ve M. Karaköse, "Derin Takviyeli Öğrenme Tabanlı Bilinmeyen Ortamda Çoklu Robot Navigasyonu", *Fırat Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, c. 34, sy 2, ss. 699-707, Eyl. 2022, doi: 10.35234/fumbd.1122947.

[15] M. Yildirim, "Haberleşme Sistemlerinde Derin Öğrenme", *Eur. J. Sci. Technol.*, ss. 1012-1025, Nis. 2020, doi: 10.31590/ejosat.679929.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Atıl Arazileri Ekonomiye Kazandırılma Portalı: AraziBul

Zehra Kandaz[a], Zeynep Kedikli[b], Mehmet Kara[c]

Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Kocaeli/Türkiye.

*Sorumlu Yazar: 220501026@kocaelisaglik.edu.tr, 220501012@kocaelisaglik.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'de atıl durumda bulunan tarım arazilerinin ekonomiye kazandırılmasına yönelik harita tabanlı bir web platformu geliştirilmiştir. . Çalışmanın temel amacı, arazi sahipleri ile tarımsal üretim yapmak isteyen bireyleri güvenli ve şeffaf bir dijital ortamda bir araya getirmektir. Bu doğrultuda geliştirilen sistem, kullanıcıların arazi ilanlarını harita üzerinden görüntüleyebilmesini, ilan oluşturabilmesini ve kiralama ya da ortak üretim tekliflerinde bulunabilmesini sağlamaktadır. Sistem mimarisi kapsamında PostgreSQL/PostGIS tabanlı bir veritabanı, Django tabanlı backend yapısı ve React tabanlı kullanıcı arayüzü kullanılmıştır. Ayrıca tapu belgelerinin doğrulanmasına yönelik görüntü işleme destekli bir kontrol mekanizması eklenmiştir. Geliştirilen portal ile verimli toprakları bulunan ülkemizde boş arazilerin ekilmesi ile hem üretim artırılacak hem de bu tarımla uğraşmak isteyen kişilerin çalışma hayatına katılması sağlanacaktır. Ayrıca geliştirilen AraziBul portalı tarım alanında çalışmak isteyen ama arazisi ve yeterince ekonomik gücü olmayan genç nüfus için yenilikçi bir istihdam fırsatı sunacak, gençlerin tarımsal üretim süreçlerine dahil olmalarını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Atıl Arazi, Dijital platform, Harita tabanlı sistem, Tarımsal üretim, Veri güvenliği.*

Project to Reintegrate Underutilized Land into the Economy: AraziBul

ABSTRACT

This study presents the development of a map-based web platform aimed at bringing idle agricultural lands in Turkey into the economy. The main objective of the study is to bring together landowners and individuals who wish to engage in agricultural production within a secure and transparent digital environment. In this context, the developed system enables users to view land listings on a map, create listings, and make rental or joint production offers. Within the system architecture, a PostgreSQL/PostGIS-based database, a Django-based backend structure, and a React-based user interface have been utilized. In addition, an image processing-supported verification mechanism has been integrated for the validation of title deed documents. Through the developed AraziBul portal, cultivating unused lands in our country, which possesses fertile soils, will both increase production and enable individuals who want to engage in agriculture to participate in working life. Furthermore, the AraziBul portal offers an innovative employment opportunity for the young population who wish to work in the agricultural sector but lack land and sufficient financial resources, facilitating their involvement in agricultural production processes.

Keywords: *Idle land, Digital platform, Map-based system, Agricultural production, Data security.*

I. GİRİŞ

Tüm dünyada ve ülkemizde tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kullanılmayan ya da terk edilmiş tarım arazilerinin ekonomiye kazandırılması önemli bir konudur. Bu arazilerin atıl kalması, hem tarımsal üretim potansiyelini azaltmakta hem de ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Li ve ark. tarafından yapılan çalışmalar, terk edilmiş arazilerin gıda güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirlik üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir [1]. Bu bağlamda, tarım arazilerinin etkin kullanımına yönelik yenilikçi ve uygulanabilir çözümler geliştirilmesi önemli bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır.

Küresel ölçekte tarım arazilerinin sürdürülebilir kullanımı, gıda güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Food and Agriculture Organization (FAO) tarafından yayımlanan *The State of Food and Agriculture*

2021 raporunda, tarım sistemlerinin çeşitli ekonomik ve çevresel baskılar altında olduğu ve bu durumun tarımsal üretimin sürekliliğini tehdit ettiği vurgulanmıştır [2]. Bu raporda özellikle arazi kullanımındaki verimsizlikler, kırsal nüfusun azalması ve iklim değişikliğinin etkileri ön plana çıkarılmıştır.

Bunu takiben yayımlanan daha güncel FAO istatistikleri ise söz konusu eğilimlerin somut verilerle desteklendiğini ortaya koymaktadır. FAO tarafından yayımlanan 2025 tarihli arazi kullanım istatistiklerine göre, 2001–2023 döneminde dünya genelinde tarım arazilerinin kullanım yapısında önemli değişimler meydana gelmiş, bazı bölgelerde tarım alanlarının üretim dışı kaldığı ve arazi kullanım dinamiklerinin bölgesel olarak farklılaştığı tespit edilmiştir [3]. Bu durum, önceki raporlarda belirtilen yapısal sorunların devam ettiğini ve tarım arazilerinin etkin kullanımına yönelik politikaların öneminin arttığını göstermektedir.

Estel ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2001–2012 dönemine ait MODIS uydu verileri kullanılarak Avrupa genelinde tarım arazilerinin terk edilme ve yeniden kullanıma açılma süreçleri analiz edilmiştir. Çalışma, bazı bölgelerde tarım arazilerinin terk edilirken bazı bölgelerde yeniden üretime kazandırıldığını göstermekte; bu durumun uygun politikalar ve planlama ile atıl arazilerin yeniden değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır [4]..

Kuntz ve ark. tarafından yapılan çalışmada, Avrupa genelinde çiftçilerin tarım arazilerini terk etme kararları analiz edilmiştir. Çalışma, özellikle yaşlı nüfus, düşük gelir ve tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilir olmaması gibi faktörlerin terk edilme kararında etkili olduğunu ortaya koymaktadır [6].

Kolecka ve Kozak tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tarım arazilerinin terk edilme durumu yüksek çözünürlüklü mekânsal veriler kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında LiDAR verileri ile oluşturulan modeller kullanılarak tarım arazilerinin terk edilme durumu parsel bazında haritalandırılmış ve bu tür veri temelli yaklaşımların arazi yönetiminde etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir [7].

Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Avrupa genelinde tarım arazilerinin terk edilme riski çok boyutlu bir modelleme yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, tarım arazilerinin yaklaşık %11'inin terk edilme riski altında olduğu ve 2030 yılına kadar bu alanların önemli bir kısmının üretim dışı kalabileceği ortaya konulmuştur [8].

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, tarım arazilerinin atıl kalması sorununun hem yapısal hem de ekonomik nedenlere bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle küçük ve parçalı arazi yapısı, kırsal kesimde genç nüfusun azalması ve tarımsal üretim maliyetlerinin yükselmesi bu durumu etkileyen başlıca faktörlerdir. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından geliştirilen politikalar kapsamında, işlenmeyen tarım arazilerinin yeniden üretime kazandırılmasına yönelik düzenlemeler yapılmış ve iki yıl üst üste işlenmeyen arazilerin kiraya verilmesine yönelik uygulamalar başlatılmıştır [9].

Yılmaz ve ark. tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de arazi kullanım değişimleri uzaktan algılama verileri ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, özellikle kırsal göçün yoğun olduğu bölgelerde tarım arazilerinin terk edilme oranının arttığı tespit edilmiş ve bu alanların yeniden değerlendirilmesi için bölgesel planlamaların önemine dikkat çekilmiştir Bununla birlikte, Aydın ve Kaya tarafından gerçekleştirilen güncel çalışmada, tarım arazilerinin terk edilme ve yeniden üretime kazandırılma süreçlerinin mekânsal modelleme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilebildiği ortaya konulmuştur. Bu kapsamda geliştirilen öngörüsel modeller, hangi bölgelerde tarım arazilerinin terk edilme riski taşıdığını ve hangi alanların yeniden üretime kazandırılabileceğini belirlemeye olanak sağlamaktadır [10]. Bu durum, atıl tarım arazilerinin etkin kullanımına yönelik geliştirilecek dijital ve veri temelli sistemlerin önemini artırmaktadır

Bu bağlamda önerilen çözüm, arazi sahipleri ile üretim yapmak isteyen bireyleri bir araya getiren, harita tabanlı ve kullanıcı odaklı bir dijital platform geliştirilmesidir. Geliştirilen sistemde, arazilerin konum bilgileri ile birlikte temel özelliklerinin şeffaf bir şekilde sunulması, kullanıcıların daha bilinçli kararlar almasına olanak tanımaktadır. Atıl arazilerin görselleştirilmesi sayesinde kullanıcıların konum bazlı arama yaparak uygun arazileri hızlı bir şekilde tespit edebilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, kullanıcıların resmi parsel sorgu sistemlerine yönlendirilmesi ile güvenilirliğin artırılması hedeflenmektedir. Platform kapsamında, arazi sahiplerinin ilan oluşturabilmesi, üretim yapmak isteyen bireylerin ise uygun arazileri filtreleyerek arayabilmesi ve taraflar arasında doğrudan iletişim kurulabilmesi sağlanmaktadır. Bu yapı, hem bilgiye erişimi kolaylaştırmakta hem de taraflar arasında güvene dayalı bir eşleşme sürecini desteklemektedir.

Önerilen bu yaklaşımın uygulanabilirliği saha çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Emlak sektörü temsilcileri ile yapılan görüşmelerde, platformda yer alan harita tabanlı gösterim, standart ilan yapısı ve resmi sistemlere yönlendirme gibi özelliklerin mevcut sistemlerde karşılaşılan güven ve erişim sorunlarını azaltabileceği ifade edilmiştir. Elde edilen geri bildirimler, geliştirilen platformun hem arazi sahipleri hem de üreticiler açısından uygulanabilir ve ihtiyaçlara uygun bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Enbir gayrimenkul ve İzmit Ziraat Odası ile saha görüşmeleri[11], Türkiye'de atıl durumda bulunan tarım arazilerinin önemli bir potansiyel barındırdığını, ancak taraflar

arasında güvene dayalı ve sürdürülebilir bir iletişim mekanizmasının yeterince gelişmediğini ortaya koymaktadır. Görüşmelerden elde edilen bulgular, mevcut sistemlerin belirli ihtiyaçları karşılasa da, arazi sahipleri ile üreticileri doğrudan ve etkin bir şekilde bir araya getirme konusunda sınırlılıklar içerdiğini göstermektedir.

Devlet tarafından sunulan parsel sorgu ve arazi bilgi sistemleri, mülkiyet ve konum gibi temel bilgilerin erişilebilirliği açısından önemli bir altyapı sağlamaktadır. Ancak bu sistemler, kullanıcılar arasında doğrudan etkileşim kurulmasına olanak tanımamakta ve üretim odaklı bir eşleşme mekanizması sunmamaktadır. Sosyal medya gruplarında gerçekleştirilen paylaşımlar kullanıcılar arasında hızlı iletişim kurulmasını sağlasa da; paylaşılan bilgilerin doğrulanabilirliğinin sınırlı olması, standart bir ilan yapısının bulunmaması ve verilerin merkezi bir veritabanında saklanmak yerine kullanıcıların silme insiyatifine açık olması, ilanların güvenilirliğini zedelemektedir. Ayrıca, bu paylaşımların kronolojik akış içerisinde hızla alt sıralarda kalarak erişilebilirliğini yitirmesi, sürdürülebilirlik açısından ciddi zorluklar barındırmaktadır.

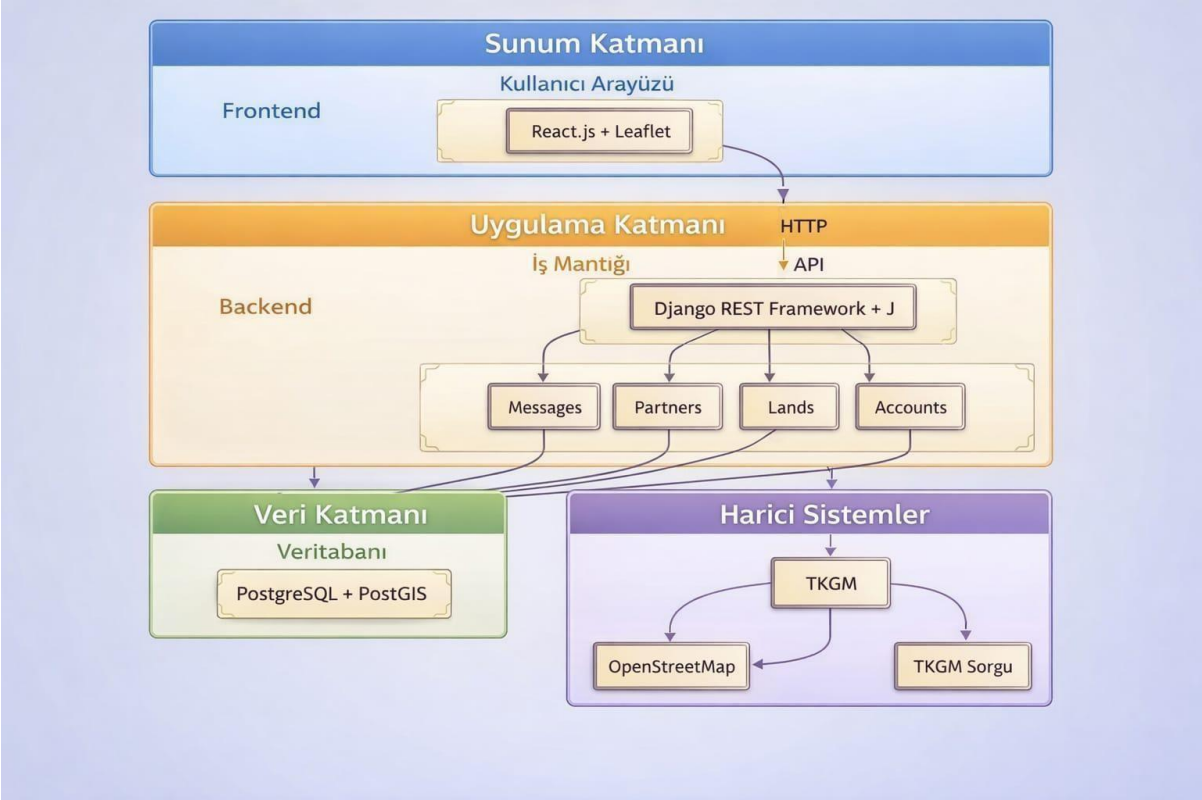
Benzer şekilde, sahibinden.com, hepsiemlak.com gibi geniş kullanıcı kitlesine sahip platformlar, erişilebilirlik açısından avantaj sağlasa da, ilanlar bölümünde arazi kiralama gibi bir seçenek bulunmamaktadır. Bu bulgular, mevcut çözümlerin belirli işlevleri yerine getirmesine rağmen, tarım arazilerinin etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak bütüncül, güvenilir ve kullanıcı odaklı bir platform ihtiyacının devam ettiğini göstermektedir.

Bu bağlamda önerilen çözüm, arazi sahipleri ile üretim yapmak isteyen bireyleri bir araya getiren, harita tabanlı ve kullanıcı odaklı bir dijital platform geliştirilmesidir. Geliştirilen sistemde, arazilerin konum bilgileri ile birlikte temel özelliklerinin şeffaf bir şekilde sunulması, kullanıcıların daha bilinçli kararlar almasına olanak tanımaktadır. Atıl arazilerin görselleştirilmesi kapsamında, harita entegrasyonu sayesinde kullanıcıların konum bazlı arama yaparak uygun arazileri hızlı bir şekilde tespit edebilmesine olanak sağlanmaktadır. Ayrıca, kullanıcıların resmi parsel sorgu sistemlerine yönlendirilmesi ile güvenilirliğin artırılması hedeflenmektedir. Platform kapsamında, arazi sahiplerinin ilan oluşturabilmesi, üretim yapmak isteyen bireylerin ise uygun arazileri filtreleyerek arayabilmesi ve taraflar arasında doğrudan iletişim kurulabilmesi sağlanmaktadır. Bu yapı, hem bilgiye erişimi kolaylaştırmakta hem de taraflar arasında güvene dayalı bir eşleşme sürecini desteklemektedir.Önerilen bu yaklaşımın uygulanabilirliği, çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha görüşmeleri ile de değerlendirilmiştir. Emlakçılar ile yapılan görüşmelerde, özellikle harita tabanlı gösterim, standart ilan yapısı ve kullanıcıların resmi sistemlere yönlendirilmesi gibi özelliklerin mevcut sistemlerde karşılaşılan güven ve erişim sorunlarını azaltabileceği ifade edilmiştir. Elde edilen geri bildirimler, geliştirilen platformun hem arazi sahipleri hem de üreticiler için ihtiyaçlara uygun bir çözüm olarak geliştirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

A. Sistem Mimarisi

Geliştirilen sistem; sunum katmanı, uygulama katmanı ve veri katmanı olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Kullanıcı arayüzü React teknolojisi ile geliştirilmiş, backend işlemleri Django anaçatısı (framework) ile gerçekleştirilmiştir. Veri yönetimi için PostgreSQL ve PostGIS kullanılmıştır. Sistemin genel mimarisi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Sistem Mimarisi

Çalışmada, atıl arazileri kullanıcılar ile buluşturmayı amaçlayan web tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, internet üzerinden erişilebilir olacak şekilde tasarlanıp sunum katmanı, uygulama katmanı, veri katmanı olmak üzere üç katmanlı mimari yapıda oluşturulmuştur.

Sunum katmanı, kullanıcıların sistemi kullandığı web arayüzünü oluşturmaktadır. Kullanıcılar bu katman üzerinden sisteme giriş yapabilir ve arazi ilanlarını erişilebilir. Bu katmanda dinamik bir yapı oluşturmak amacıyla React.js kullanılmıştır.

Uygulama katmanı, sistemin asıl işleyişinin gerçekleştiği katmandır. Kullanıcı işlemleri, arazi ilanlarının eklenmesi ve görüntülenmesi, filtreleme işlemleri ve mesajlaşma gibi fonksiyonlar bu katmanda yürütülmektedir. Backend tarafında Django ve Django REST Framework kullanılarak frontend ile veri tabanı arasında iletişim sağlanmıştır.

Veri katmanı, sistemde kullanılan tüm bilgilerin saklandığı bölümdür. Kullanıcı bilgileri, arazi ilanları ve konum bilgileri bu katmanda tutulmaktadır. Konumsal verilerin yönetimi için PostgreSQL veri tabanı ve PostGIS eklentisi kullanılmıştır. Bu sayede harita tabanlı sorgular daha kolay bir şekilde yapılabilmektir.

Harici Sistemler *:* Çalışmada kapsamında tapu ve parsel bilgileri için resmi bir sistem olan TKGM parsel sorgu kullanılmaktadır. Ancak TKGM parsel sorgu ile doğrudan bir veri alışverişi yapılmamaktadır. Kullanıcılar, arazi doğrulaması için sadece ilgili resmi siteye yönlendirilmektedir.

Sunucu ve Barındırma: Sistem, bulut tabanlı bir sunucu üzerinde çalışacak şekilde tasarlanacaktır. Bu sayede sistemin her yerden erişilebilir olması hedeflenmiştir. Web uygulaması, bir web sunucusu üzerinden yayınlanacaktır.

B. Tapu Doğrulama Mekanizması

Tapu doğrulama süreci doğrudan veri saklama yerine belge kontrolüne dayandırılmıştır. Belgeler Temel doğrulama sürecinden geçirilmektedir. Bu yaklaşım, veri güvenliği ve hukuki uygunluk açısından tercih edilmiştir.



Şekil 2. Tapu doğrulama mekanizması

Şekil 2'de bir dijital belge doğrulama sisteminin çalışma mantığını ve kullanıcı geri bildirim mekanizmasını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Sistem, kullanıcı tarafından yüklenen dosyayı analiz ederek bunun bir "tapu belgesi" olup olmadığını tespit etmeye çalışır ve sonucunu geri bildirim olarak verir.

C. Sistem Akışı ve Kullanım Süreci

Sistem, kullanıcıların platform üzerindeki işlemlerini düzenli ve bütünleşik bir yapı içerisinde gerçekleştirebileceği şekilde tasarlanmıştır. Kullanıcı merkezli bu yapı, farklı işlevlerin modüler bileşenler altında toplanmasını sağlayarak sistemin anlaşılabilirliğini ve kullanım kolaylığını artırmaktadır. Sistemin genel işlem yapısı ve modüller arası ilişkiler Şekil 3'te gösterilmektedir.

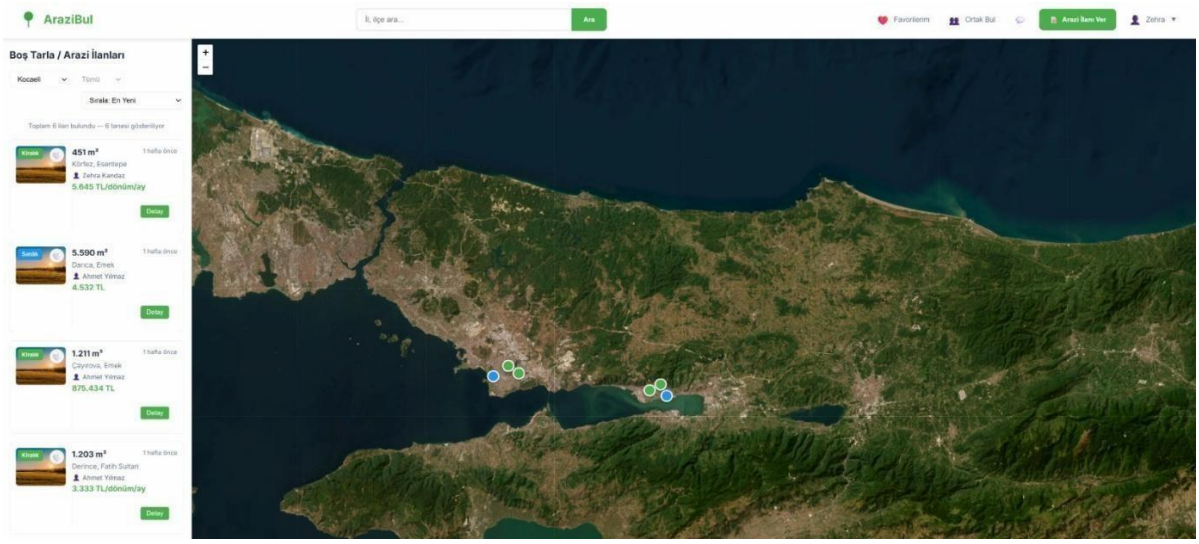


Şekil 3. Use-case diyagramı

Profil Yönetimi: Kullanıcıların kişisel bilgilerini, hesap güvenlik ayarlarını ve platform tercihlerini düzenleyebildiği temel yönetim bileşenidir.
Arazi İlanı Oluştur/Yönet: Kullanıcıların sisteme yeni arazi verileri eklemesine, mevcut ilanlarının detaylarını güncellemesine ve yayından kaldırmasına olanak tanır.
Haritada Arazi Ara: Kullanıcılara coğrafi bilgi sistemi (CBS) destekli bir arayüz sunarak, lokasyon bazlı ve spesifik filtrelere dayalı detaylı arazi araştırması yapma imkânı verir.
Uydu Görüntüsü Analizi: Kullanıcıların, ilgilendikleri arazilerin fiziksel ve tarımsal durumlarını güncel uydu verileri aracılığıyla değerlendirmesini sağlayan analitik modüldür.
Tapu Doğrulama: İlanların güvenilirliğini sağlamak amacıyla, sisteme girilen mülkiyet bilgilerinin doğrulanmasına yönelik tasarlanmış güvenlik ve teyit işlevidir.
Ortaklık İlanı Oluştur/Ara: Tarımsal üretim, yatırım veya işletme odaklı işbirliklerini teşvik etmek amacıyla kullanıcıların ortak arayışlarını sistem üzerinden ilan etmesini ve mevcut fırsatları incelemesini sağlar.
Mesajlaşma: Platform içerisindeki kullanıcılar (alıcılar, satıcılar ve potansiyel ortaklar) arasında doğrudan, güvenilir iletişim kurulmasını sağlayan haberleşme altyapısıdır.
Favoriler: Araştırma sürecini kolaylaştırmak amacıyla, kullanıcıların ilgilerini çeken veya takibe almak istedikleri ilanları kendi profillerinde arşivlemelerini sağlar.

D. Sistem Arayüzü

AraziBul platformuna ait harita tabanlı kullanıcı arayüzü. Sistem üzerinde kullanıcılar, konum bazlı olarak atıl tarım arazilerini görüntüleyebilmekte, listeleme paneli aracılığıyla detaylı bilgilere erişebilmekte ve filtreleme işlemleri gerçekleştirebilmesi şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Arazi Bulma Sistem arayüzü.

Geliştirilen AraziBul platformunun kullanıcı arayüzü, kullanıcıların atıl tarım arazilerine kolay, hızlı ve konum tabanlı erişim sağlayabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, harita tabanlı bir yapı üzerine kurulmuş olup kullanıcıların coğrafi konuma göre arazi araması yapabilmesine olanak tanımaktadır. Arayüzde, uydu görüntüsü üzerinde işaretlenmiş arazi konumları görselleştirilmekte ve kullanıcıların bu noktalar üzerinden ilgili ilanlara erişmesi sağlanmaktadır.

Arayüzün sol panelinde yer alan listeleme alanı, kullanıcılara mevcut arazi ilanlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. Bu bölümde her bir arazi için büyüklük, konum, ilan türü (kiralık/satılık), fiyat bilgisi ve ilan sahibi gibi temel bilgiler gösterilmektedir. Kullanıcılar bu liste üzerinden filtreleme ve sıralama işlemleri gerçekleştirebilmekte, böylece ihtiyaçlarına en uygun arazilere daha hızlı ulaşabilmektedir.

Üst menü kısmında yer alan arama çubuğu sayesinde kullanıcılar il, ilçe veya arazi türüne göre arama yapabilmektedir. Bu yapı, kullanıcı deneyimini artırmayı ve platformun erişilebilirliğini güçlendirmeyi hedeflemektedir.

Geliştirilen bu arayüz, atıl tarım arazilerinin dijital ortamda görünür hale getirilmesini sağlayarak, arazi sahipleri ile üreticiler arasında doğrudan bir bağlantı kurulmasına olanak tanımakta ve tarım arazilerinin yeniden üretime kazandırılmasına katkı sağlamaktadır.

III. SONUÇLAR

Tarım geçmişte olduğu gibi gelecekte de ülkemiz ve tüm dünya için stratejik alanların başında gelmektedir. Bu yüzden var olana tarım alanların tamamının ülke ekonomisine katılması kritik önem

taşımaktadır. Saha çalışmaları kapsamında emlak sektörü temsilcileri ve potansiyel kullanıcılarla gerçekleştirilen kapsamlı görüşmeler sonucunda, Türkiye'de atıl durumda bulunan tarım arazilerinin önemli bir üretim potansiyeli barındırdığı; ancak bu potansiyelin mevcut şartlarda yeterince değerlendirilmediği tespit edilmiştir. İlgili görüşmelerde, arazi sahiplerinin büyük bir kısmının arazilerini tarıma kazandırmak niyetinde olduğu; fakat bilgi eksikliği, zaman yetersizliği ve uygun ortak veya kiracı bulma zorlukları gibi sebeplerle harekete geçemedikleri saptanmıştır. Arazi sahipleri ile üretim yapmak isteyen bireyler arasında doğrudan ve güvene dayalı bir iletişim mekanizmasının bulunmaması, arazilerin atıl kalmasının temel nedeni olarak öne çıkmıştır.

Tespit edilen bu saha ihtiyaçları ve kullanıcı beklentileri doğrultusunda; mevcut sistemlerdeki eksiklikleri gideren, karmaşık teknik detaylardan arındırılmış, kullanıcı dostu bir dijital platform geliştirilmiş ve gerçekleşmiştir. Geliştirilen bu uygulamada, arazilerin konum ve çevresel özelliklerini görselleştiren "harita tabanlı bir bulma altyapısı" kullanılarak kullanıcıların karar verme süreçlerinin kolaylaştırılması sağlanmıştır. Ayrıca platformun, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Parsel sorgu sistemlerine yönlendirme yapacak şekilde kurgulanması ve kullanıcılardan hiçbir ilan veya aracılık ücreti talep edilmemesi, yapılan kullanıcı mülakatlarında sisteme duyulan güveni ve şeffaflığı artıran en önemli unsurlar olarak ifade edilmiştir. Geleneksel kiralama modelinin yanı sıra, uygulamada "ortak üretim" ve "gönüllü kullanım" gibi farklı modellerin açık şekilde sunulmasının, hedef kitlenin sistemi kullanım motivasyonunu arttıracağı değerlendirilmektedir.

Geliştirilen platformun pratik kullanım süreçlerinden elde edilen veriler ve kullanıcılarla yapılan yüz yüze görüşmeler ışığında, çalışmanın temel hipotezlerine dair ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Harita Altyapısının Etkisi: Gerçekleşen uygulamadaki harita tabanlı görselleştirme araçlarının, arazilerin

mekânsal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak karar verme süreçlerini kolaylaştırdığı ve arazi kullanım potansiyelini doğrudan artırdığı gözlemlenmiştir.

Alternatif Modellerin Üretime Katkısı: Uygulama üzerinden fiili olarak sunulan "ortak üretim" modelinin, sadece kiralama yapmak istemeyen kullanıcıları da sisteme çekerek üretime aktif katılımı artırdığı görüşmelerle doğrulanmıştır.

Eşleşme Süreçlerinin Hızlanması: Platformda yer alan çift yönlü ilan altyapısının (hem arazi arayan hem de arazi sunan kitleyi buluşturması), taraflar arasındaki eşleşme sürecini ve iletişimi uygulamalı olarak hızlandırdığı tespit edilmiştir.

Sistem Güvenilirliğinin Tesis Edilmesi: Sisteme entegre edilen bilgi doğrulama mekanizmalarının ve şeffaf yapının, taraflar arasındaki güven eksikliğini giderdiği ve platformun benimsenmesinde olumlu bir etki yarattığı saptanmıştır.

Dijital İş Birliğinin Gücü: İhtiyaca yönelik tasarlanan böyle bir dijital platformun, arazi sahipleri ve girişimciler arasında sadece bir ilan panosu işlevi görmeyip; tarımsal iş birliğini ve iletişimi artıran bir köprü kurduğu uygulama sonuçlarıyla ortaya konmuştur.

Gelecekteki çalışmalarda, AraziBul platformuna yapay zeka (AI) destekli ürün öneri sistemleri entegre edilebilir. Toprak analiz verileri ve iklim koşulları AI algoritmaları ile işlenerek, belirli bir arazi için en yüksek verimin alınabileceği ürün türleri kullanıcıya otomatik olarak sunulabilir. Ayrıca, platformun ulusal tarım politikalarıyla tam entegre bir otomasyon sistemine dönüştürülmesi, Türkiye'nin tarımsal dijital dönüşümüne stratejik bir katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Li, Y., Zhang, Y., Liu, Y., & Long, H. (2023). *The extent, drivers and production loss of farmland abandonment in China: Evidence from a spatiotemporal analysis of farm households survey*. Journal of Cleaner Production, 393, 137772. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137772

[2] Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. FAO. https://doi.org/10.4060/cb4476en

[3] Food and Agriculture Organization (FAO). (2025). *Land statistics 2001–2023: Global, regional and country trends (FAOSTAT. 107)*. FAO. https://doi.org/10.4060/cd5765en

[4] [4] Estel, S., Kuemmerle, T., Alcántara, C., Levers, C., Prishchepov, A. V., & Hostert, P. (2015). *Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series*. Remote Sensing of Environment, 163, 312–325. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028

[5] Kuntz, M., et al. (2018). *Farmer decision-making and agricultural land abandonment in Europe*. Land Use Policy, 78, 439–449. https://www.mdpi.com/2073-445X/7/4/128

[6] Kolecka, N., & Kozak, J. (2014). *Assessment of the accuracy of forest cover change detection using LiDAR data.* European Journal of Remote Sensing, 47(1), 1–17.

[7] European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2018). *Farmland abandonment in the EU: Risk assessment and policy implications.* Publications Office of the European Union.

[8] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). *İşlenmeyen Tarım Arazilerinin Tarımsal Amaçlı Kiraya Verilmesine İlişkin Yönetmelik*.

[9] Yılmaz, E., et al. (2020). *Türkiye'de arazi kullanım değişimlerinin uzaktan algılama ile analizi*. Türkiye'de arazi kullanım değişimlerinin uzaktan algılama ile analizi. *Türkiye Coğrafya Dergisi*, (73), 45–58.

[10] Aydın, O., & Kaya, F. (2024). *Projecting agricultural land abandonment and expansion in Türkiye using the Subspace KNN algorithm (2030)*. Coğrafya Dergisi. https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1270738

[11] ENBİR GAYRİMENKUL YAPI İNŞAAT OTOMOTİV TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Biyometrik Sistemlerde Parmak İzi Verilerinin Kriptografik Yöntemlerle Korunması

Mahmut Tepetam, Zeynep Behrin Güven Aydın*

[a]Doğuş Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** 202291009015@dogus.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, biyometrik parmak izi verilerinin güvenli bir ağ üzerinden veri tabanına iletilmesi ve şifreli olarak depolanması için bütüncül bir güvenlik mimarisi sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen parmak izi şablonları, AES-256 algoritmasının CBC ve GCM modları kullanılarak şifrelenmiş ve veri tabanında ikili (binary) formatta saklanmıştır. Şifreleme sürecinde güvenlik seviyesini artırmak amacıyla kullanıcı anahtarları SHA-256 ile türetilmiş; CBC modunda başlangıç vektörü (IV), GCM modunda ise rastgele üretilen nonce değerleri kullanılarak her işlemde özgün çıktılar elde edilmiştir. Veri iletim aşamasında ise ağ güvenliğini sağlamak için noktadan noktaya VPN ve SSL VPN protokollerinden yararlanılmıştır. 50 farklı katılımcıdan elde edilen veriler üzerinde yapılan testler sonucunda; her iki modun da güvenli depolama sağladığı, ancak GCM modunun dahili veri bütünlüğü doğrulama yeteneği sayesinde CBC moduna oranla ek bir güvenlik katmanı sunduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin biyometrik verilerin gizliliği ve bütünlüğünün korunmasında uygulanabilir ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir."

Anahtar Kelimeler: *AES, Biyometrik sistemler, CBC, GCM, veri güvenliği.*

Protection of Fingerprint Data in Biometric Systems Using Cryptographic Methods

Mahmut Tepetam, Zeynep Behrin Güven Aydın*

[a]Doğuş University, , Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** 202291009015@dogus.edu.tr

ABSTRACT

"This study aims to present a comprehensive security architecture for the secure transmission and encrypted storage of biometric fingerprint data within a database environment. Fingerprint templates obtained during the study were encrypted using AES-256 algorithm in CBC and GCM modes and stored in binary format. To enhance the security level, user-defined keys were transformed using SHA-256; unique outputs were ensured by utilizing Initialization Vectors (IV) for CBC mode and random nonce values for GCM mode. Secure communication during data transmission was established via point-to-point VPN and SSL VPN protocols. Tests conducted on data from 50 different participants revealed that while both modes provide robust encryption, the GCM mode offers an additional security advantage over CBC due to its built-in data integrity authentication feature. The results demonstrate that the proposed method is a viable and reliable model for ensuring the confidentiality and integrity of biometric data."

Keywords: *AES, Biometric Systems, Data Security, CBC, GCM*

I. GİRİŞ

Kamu kurumları veya özel sektörde kimlik doğrulama, personel devam takip, Öğrenci bilgi sistemi, Bina girişleri, yazıcıdan çıktı alma, çay kahve otomatları veya bilgisayar login ekranları gibi alanlarda Kartlı sistemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kartların kaybedilmesi, çalınma riski ya da başkalarına verilerek kullandırılması gibi durumlarda güvenlik açığı ya da suistimaller ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple kişinin karakteristik veya fizyolojik özelliklerini kullanan biyometrik sistemlerin kullanımı

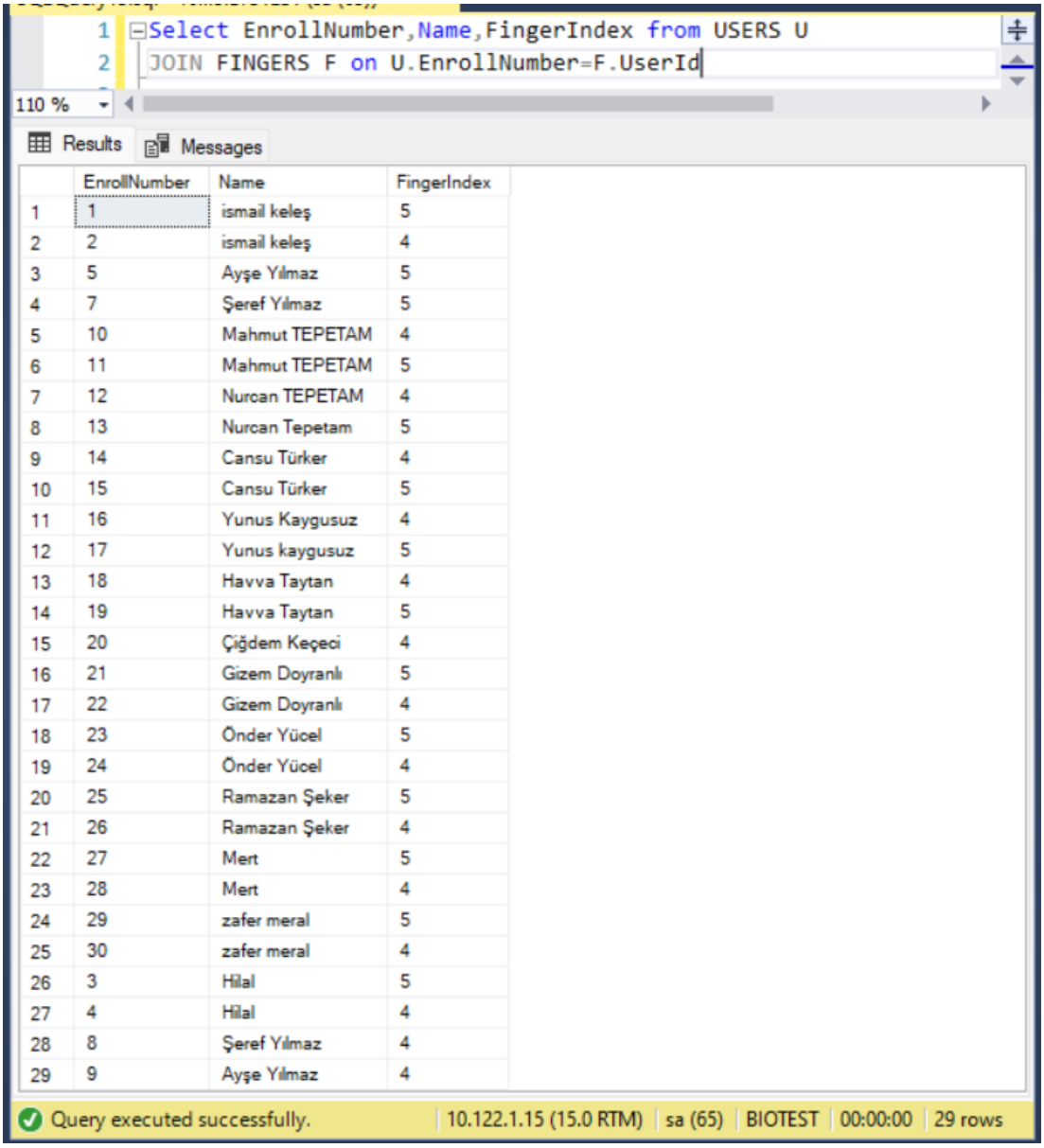
yaygınlaşmaktadır. Biyometrik sistemlerin yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte biyometrik verinin saklama koşulları da önem arz etmektedir. Sahada kullanılan cihazların tamamına yakını tekil çalışsa bile veri tabanına veriler aktarılarak ilerlenmektedir. Bu noktada biyometrik veririnin güvenliği ön plana çıkmaktadır. Biyometrik veri kişiye özgü ve değiştirilemez olduğu için güvenli bir şekilde iletilerek saklanmalıdır. Bu çalışmada parmak izi cihazları baz alınarak ilerlenmiştir. Sahada kullanılan cihazlar veri tabanına bölgeden bölgeye Virtual Private Network (VPN) aracılığı ile bağlantı sağlamaktadır. İletilen verinin güvenliğini sağlamak amacıyla Advanced Encryption Standard (AES) şifreleme tercih edilmiş ve biyometrik veri, veri tabanı ortamında şifreli binary olarak saklanmıştır. AES algoritmasının Chiper Block Chaining (CBC) ve Galois Counter Mode (GCM) modları kullanılarak veri tabanına kayıt öncesi şifreleme işlemleri yapılmıştır. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri performans kıyaslaması işlemine tabi tutularak performans ölçümü yapılmıştır.

II. UYGULAMA VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Günümüzde biyometrik sistemler geçiş kontrol sistemleri veya personel devam takip sistemi olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Biyometrik sistemler içerisinde en çok tercih edileni ise parmak izi sistemleridir. Parmak izi sistemleri çok lokasyonlu kurum ve kuruluşlarda Personel Devam Kontrol Sistemi (PDKS) olarak kullanılmaktadır. Cihazların bulunduğu yerler merkezden ya da sunucu sistemlerinden uzakta olduğunda güvenlik konusu daha önemli hale gelmektedir. Bu sebeple uygulamamızda parmak izi verisi AES-256 simetrik şifreleme algoritması güvenlik amacıyla kullanılmıştır. Şifreleme işleminde kullanıcı tarafından belirlenen bir anahtar Secure Hash Algorithm (SHA)-256 algoritmasıyla 256 bit bir anahtara dönüştürülmüş. AES Algoritması CBC ve GCM modunda uygulanmıştır. CBC modunda Başlangıç vektörü kullanılarak her defasında farklı veri elde edilmiştir. GCM modunda her şifrelemede rastgele üretilen nonce kullanılmıştır. Bu sayede her çalıştırmada farklı çıktılar elde edilmiştir. Aynı zamanda veri tabanı bağlantısı için de VPN tercih edilmiştir. Uygulamamızda piyasada ekonomik olması sebebiyle en çok tercih edilen ZKSoftware ürünü tercih edilmiştir. Model olarak ZKTeco T4-C model parmak izi okuyucu cihazı kullanılmıştır. Cihazı uygulamadan yönetebilmek için ZKTeco ya ait zkemkeeper.dll kullanılmıştır. Uygulama geliştirme ortamı olarak Visual Studio C# tercih edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen biyometrik veri güvenliği sisteminin (AES-CBC ve AES-GCM karşılaştırması) pratik uygulanabilirliğini ve performans çıktılarını değerlendirmek amacıyla, toplam 15 katılımcıdan oluşan bir veri seti üzerinde deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Katılımcı sayısının belirlenmesinde, literatürde yeni bir teknik yaklaşımın veya algoritma performansının test edildiği çalışmalarda kabul gören 'pilot uygulama' ve 'kullanılabilirlik testleri' kriterleri esas alınmıştır. Nitekim, Nielsen ve Landauer (1993) [3] ile Virzi (1992) [4] gibi temel kaynaklar, sistemdeki kritik hataların ve performans karakteristiklerinin %80'inden fazlasının ilk 10-15 kullanıcı ile tespit edilebileceğini savunmaktadır. Bu doğrultuda, 15 kişilik bu odak grup üzerinden elde edilen veriler; önerilen şifreleme modlarının işlem süresi, veri bütünlüğü ve manipülasyon tespiti gibi teknik parametrelerini istatistiksel olarak anlamlı bir düzeyde ortaya koymak için yeterli görülmüştür. Türkiye Cumhuriyeti resmî gazetesinde 2023'te yayınlanan küçük ve orta büyüklükteki işletmeler mevzuatında mikro işletmeler 10 kişiden az, küçük işletmeler 50 kişiden az olarak tanımlanmıştır [5].

Bu çalışmada kullanılan parmak izi verileri gerçek kişilerin parmaklarından ZKTeco parmak izi cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmamız 15 kişiye ait 30 farklı parmak izi verisi üzerinde yapılmıştır. Her bir kişinin birden fazla parmağı üzerinde test yapılmıştır. Her parmak için farklı şablon verisi üretilmiştir.



	EnrollNumber	Name	FingerIndex
1	1	ismail keleş	5
2	2	ismail keleş	4
3	5	Ayşe Yılmaz	5
4	7	Şeref Yılmaz	5
5	10	Mahmut TEPETAM	4
6	11	Mahmut TEPETAM	5
7	12	Nurcan TEPETAM	4
8	13	Nurcan Tepetam	5
9	14	Cansu Türker	4
10	15	Cansu Türker	5
11	16	Yunus Kaygusuz	4
12	17	Yunus kaygusuz	5
13	18	Havva Taytan	4
14	19	Havva Taytan	5
15	20	Çiğdem Keçeci	4
16	21	Gizem Doyranlı	5
17	22	Gizem Doyranlı	4
18	23	Önder Yücel	5
19	24	Önder Yücel	4
20	25	Ramazan Şeker	5
21	26	Ramazan Şeker	4
22	27	Mert	5
23	28	Mert	4
24	29	zafer meral	5
25	30	zafer meral	4
26	3	Hilal	5
27	4	Hilal	4
28	8	Şeref Yılmaz	4
29	9	Ayşe Yılmaz	4

Şekil 1. Test Yapılanlar Listesi

ZKTeco cihazından veriler base64string formatında gelmiş olup ham veri boyutları 450- 600 byte aralığında olduğu görülmüştür. Cihazdan gelen ham veriler şifreleme ve veri tabanına kaydetmek amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışma ZKTeco T4-c parmak izi okuyucu cihazı kullanılarak yapılmıştır. ZKTeco parmak izi okuyucu cihazı enrolment adı verilen parmak izi tanımlama ve verification adı verilen doğrulama işlemlerini kendi içerisinde yapabilmektedir. Bu süreçleri yazılımsal olarak sunabilmek için de zkemkeeper.dll SDK kütüphanesini sunmaktadır.

Enrolment işlemi sırasında cihazdan alınan veriler uygulama katmanında alınarak şifreli şekilde veri tabanına aktarılmıştır. Doğrulama aşamasında kaydedilen veriler şifre çözme işlemi sonrası cihazdan gelen veri ile karşılaştırılarak işlemler yapılmıştır.

Uygulama ve test işlemleri için Intel Core i7 işlemci (2.6 GHz), 16 GB RAM ve NVMe SSD depolama birimine sahip laptop kullanılmıştır. İşletim sistemi olarak windows 11 kullanılmıştır. Geliştirme ortamı olarak visual studio ile C# kodlama tercih edilmiştir.

A. Parmak İzi Verilerinin Alınması

Parmak izi cihazından parmak izi alma ya da tanımlama işlemi enrollment olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada bu işlem T4-C cihazında bulunan optik sensör aracılığıyla yapılmaktadır. Cihaz parmağın üzerinde bulunan minuate yani oyuk ve çıkınlardan elde edilen verileri kendi algoritmaları sayesinde sıkıştırıp

standartlaştırarak şablon formatına dönüştürmektedir. Bu şablon parmak izine ait sayısal verileri içeren bir yapıdır.

Cihazın şablon haline getirmiş olduğu veri cihaza ait SDK ile alınmaktadır. Cihazdan alınan base64 string formatındaki veri şifreleme işlemi sonrası veri tabanına kaydedilmektedir.



Şekil 2. Enrolment işlemi.

```
try
{
    using var conn = DatabaseConnection.Instance.GetConnection();

    string sql = @"
    INSERT INTO FINGERS (UserId, FingerIndex, TemplateData, CreateDate)
    VALUES (@UserId, @FingerIndex, @TemplateData, @CreateDate)";

    using var cmd = new SqlCommand(sql, conn);
    cmd.Parameters.AddWithValue("@UserId", userId);
    cmd.Parameters.AddWithValue("@FingerIndex", fingerIndex);
    cmd.Parameters.AddWithValue("@TemplateData", encryptedTemplate);
    cmd.Parameters.AddWithValue("@CreateDate", DateTime.Now);

    return cmd.ExecuteNonQuery() > 0;
}
catch (Exception ex)
{
    AppLogger.Log("DB Save Error: " + ex.Message);
    return false;
}
```

B. Parmak İzi Verilerinin Şifrelenmesi

Parmak izi verileri, biyometrik bilgiler olmaları nedeniyle yüksek güvenlik gereksinimine sahiptir. Bu nedenle çalışmada elde edilen parmak izi şablonları veri tabanına kaydedilmeden önce AES-256 tabanlı simetrik şifreleme algoritmaları kullanılarak şifrelenmiştir.

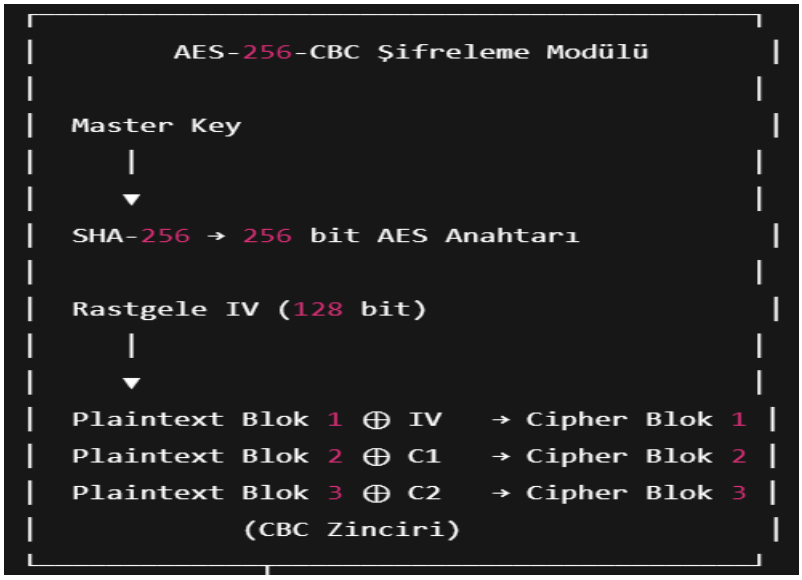
Çalışma kapsamında iki farklı şifreleme modu uygulanmıştır:

AES-256-CBC

AES-256-GCM.

B.1. AES 256 CBC Encryption İşlemi

Parmak izi cihazından gelen vektörel veri base64string olarak geldiği için byte veriye dönüştürülür. Kullanıcı tarafından belirlenen master key Cryptography kütüphanesinde SHA 256 yardımıyla 256 bitlik şifreleme anahtarı üretilir. Gene Cryptography kütüphanesinde yer alan GenerateIV method ile initialization vektör oluşturulur. Bu vektörün oluşturulma sebebi her şifrelemede farklı çıktılar elde etmek. Oluşturulan IV ve master key le CBC modu kullanılarak parmak izi cihazından gelen veri şifrelenir.



Şekil 3. AES-256-CBC Şifreleme

```
private readonly byte[] _key;

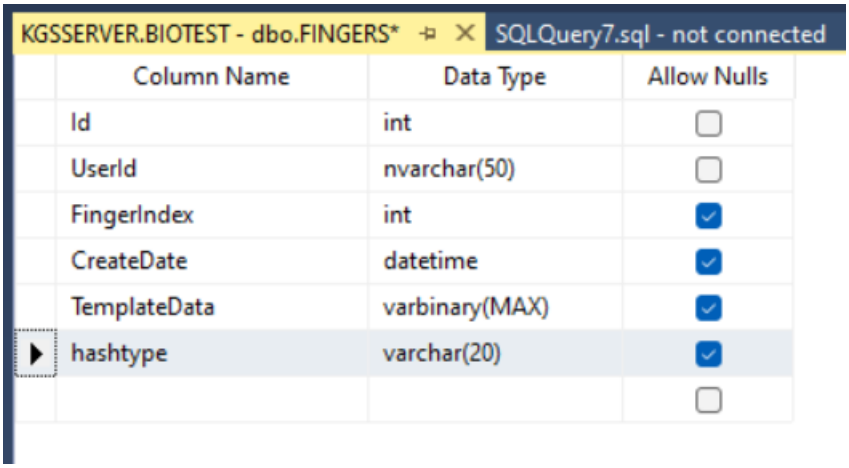
1 reference
public EncryptionService(string masterKey)
{
    using var sha = SHA256.Create();
    _key = sha.ComputeHash(Encoding.UTF8.GetBytes(masterKey)); // 32 byte key
}

1 reference
public byte[] Encrypt(byte[] plainBytes)//CBC şifreleme methodu
{
    using var aes = Aes.Create();
    aes.Key = _key;
    aes.Mode = CipherMode.CBC;
    aes.Padding = PaddingMode.PKCS7;
    aes.GenerateIV(); // her şifreleme için rastgele IV

    using var encryptor = aes.CreateEncryptor();
    byte[] encrypted = encryptor.TransformFinalBlock(plainBytes, 0, plainBytes.Length);

    // IV + EncryptedData birlikte dön
    byte[] result = new byte[aes.IV.Length + encrypted.Length];
    Buffer.BlockCopy(aes.IV, 0, result, 0, aes.IV.Length);
    Buffer.BlockCopy(encrypted, 0, result, aes.IV.Length, encrypted.Length);
    AppLogger.Log("encrypt işlemi tamamlandı");
    return result;
}
```

Şifrelenen veri binary olarak veri tabanına bir bütün olarak Güvenli bir şekilde kaydedilir.



Bu mimari, ISO/IEC 24745 biyometrik bilgi koruma standartlarının önerdiği "template protection" prensipleri ile uyumludur [1]. Bu mimaride her kullanımda aynı anahtar üretilir. Uygulama yeniden başlatılsa dahi aynı anahtar üretilir. Anahtar doğrudan text olarak değil de kriptografik özetleme (hashing) yönteminden geçirilerek saklandığı için ek güvenlik önlemi alınmış olunur[1], [2].

B.2. AES 256 CBC Decryption

AES-256-CBC şifre çözme işleminde, her şifreli blok önce AES algoritması ile çözülmekte, ardından zincirleme yapı gereği bir önceki şifreli blok veya başlangıç vektörü ile XOR işlemine tabi tutulmaktadır.

XOR işlemi iki bitlik veri üzerinde çalışır bu işlemde giriş bitleri aynı ise 0 farklı ise 1 değerini verir. Cryptografide XOR işlemi verilerin geri döndürülebilir şekilde birbiri ile karıştırılmasını sağladığı için tercih edilmektedir.

Son adımda ise PKCS#7 dolgu bilgisi kaldırılarak gerçek açık metin elde edilmektedir.

```
private readonly byte[] _key;
1 reference
public EncryptionService(string masterKey)
{
    using var sha = SHA256.Create();
    _key = sha.ComputeHash(Encoding.UTF8.GetBytes(masterKey)); // 32 byte key
}

0 references
public byte[] Decrypt(byte[] encryptedBytes)
{
    using var aes = Aes.Create();
    aes.Key = _key;
    aes.Mode = CipherMode.CBC;
    aes.Padding = PaddingMode.PKCS7;

    // İlk 16 byte IV
    byte[] iv = new byte[16];
    byte[] cipher = new byte[encryptedBytes.Length - 16];

    Buffer.BlockCopy(encryptedBytes, 0, iv, 0, 16);
    Buffer.BlockCopy(encryptedBytes, 16, cipher, 0, cipher.Length);

    aes.IV = iv;

    using var decryptor = aes.CreateDecryptor();
    return decryptor.TransformFinalBlock(cipher, 0, cipher.Length);
}
```

Decryption işlemi sonrasında elde edilen vektörel şablon tekrar cihaza göndermek için veya cihazdan gelen veri ile karşılaştırma için kullanılabilir[6].

CBC şifreleme yapılırken PKCS#7 padding uygulanmıştır, Padding blok şifreleme yapılırken verinin blok boyutuna tamamlanması amacıyla kullanılan bir dolgu yöntemidir. AES-CBC modunda yaygın olarak PKCS#7 padding uygulanmakta olup, çözme aşamasında bu dolgu baytları kaldırılarak gerçek veri elde edilmektedir.

C. AES 256 GCM Şifreleme Servisi

Verilerin şifrelenmesi ve şifrelerin çözülmesi için iki adet fonksiyona sahip EncryptionServiceGCM adında sınıf oluşturulmuştur.

C.1. AES 256 GCM Encryption

ZKTeco T4-c parmak okuyucu cihazından alınan parmak izi verisi base64 string türündedir. AES Encryption işlemi yapabilmek için base64string olarak gelen veri byte türüne dönüştürülmektedir.

```
// Cihazdan template alınıyor
string base64Template = GetTemplate(enrollNumber, fingerIndex);

if (string.IsNullOrEmpty(base64Template))
{
    AppLogger.Log("Template alınamadı!");
    return;
}
//cihazdan gelen templati byte dönüştürülüyor
byte[] templateBytes = Convert.FromBase64String(base64Template);

var cryptoGCM = new EncryptionServiceGcm("MY_SECRET_KEY_123456789");

//byte olan data GCM ile şifreleniyor
byte[] encryptedTemplate = cryptoGCM.Encrypt(templateBytes);
AppLogger.Log("AES-256-GCM ile şifrelendi");
```

Byte tipine dönüştürülen veri encrypt fonksiyonuna gönderilmektedir.

```
1 reference
public EncryptionServiceGcm(string masterKey)
{
    using var sha = SHA256.Create();
    _key = sha.ComputeHash(Encoding.UTF8.GetBytes(masterKey)); // AES-256 key
}
1 reference
public byte[] Encrypt(byte[] plaintext)
{
    byte[] nonce = new byte[12];   // GCM standard nonce size
    new SecureRandom().NextBytes(nonce);

    GcmBlockCipher cipher = new GcmBlockCipher(new AesEngine());
    AeadParameters parameters = new AeadParameters(new KeyParameter(_key), 128, nonce);

    cipher.Init(true, parameters);

    byte[] ciphertext = new byte[cipher.GetOutputSize(plaintext.Length)];
    int len = cipher.ProcessBytes(plaintext, 0, plaintext.Length, ciphertext, 0);
    cipher.DoFinal(ciphertext, len);

    // Output format → NONCE | CIPHERTEXT
    byte[] output = new byte[nonce.Length + ciphertext.Length];
    Buffer.BlockCopy(nonce, 0, output, 0, nonce.Length);
    Buffer.BlockCopy(ciphertext, 0, output, nonce.Length, ciphertext.Length);

    return output;
}
```

Güvenliği artırmak amacıyla şifreleme için 256bit anahtar tercih edilmiştir. Counter değerlerinin oluşturulmasında başlangıç değeri oluşturması için nonce oluşturulmuştur. Şifreleme işlemi sonucunda elde edilen nonce değeri, şifreli veri ve doğrulama etiketi birleştirilerek çıktı üretilmiştir.

C.2. AES 256 GCM Decryption

AES-256-GCM şifre çözme işleminde, şifreleme yapılırken 12 byte nonce kısmı şifreli veriden çıkarılır. Bu veri counter değerlerinin oluşturulmasında kullanılmıştı. Nonce değeri çıkarma işleminden sonra elimizde şifreli veri ve doğrulama etiketini içeren chipertext kalmaktadır.

```
public byte[] Decrypt(byte[] encryptedData)
{
    byte[] nonce = new byte[12];
    Buffer.BlockCopy(encryptedData, 0, nonce, 0, nonce.Length);

    byte[] ciphertext = new byte[encryptedData.Length - nonce.Length];
    Buffer.BlockCopy(encryptedData, nonce.Length, ciphertext, 0, ciphertext.Length);

    GcmBlockCipher cipher = new GcmBlockCipher(new AesEngine());
    AeadParameters parameters = new AeadParameters(new KeyParameter(_key), 128, nonce);

    cipher.Init(false, parameters);

    byte[] plaintext = new byte[cipher.GetOutputSize(ciphertext.Length)];
    int len = cipher.ProcessBytes(ciphertext, 0, ciphertext.Length, plaintext, 0);
    cipher.DoFinal(plaintext, len);

    return plaintext;
}
```

Sonraki aşamada şifreleme aşamasında kullanılan anahtar değeri, 128 bitlik doğrulama tag ı ve nonce değeri parametre olarak tanımlanır. Son olarak GCM işlemi tersine işlem yapılarak şifresiz metin değeri elde edilir.

III. SONUÇ

Yapılan çalışmalar için İntel İ7 işlemci,16gb ram ve windows11 işletim sistemi olan laptop kullanılmıştır. Şifreleme işlemlerinde AES algoritmaları için visual studio da Cryptography kütüphanesi kullanılmıştır.

Performans Testleri için AES algoritmasının GCM ve CBC modları kullanılmıştır. Şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde benchmark işlemi yapılmıştır. Daha sağlıklı sonuçlar alabilmek amacıyla 5000 tekrarlı for döngüsü kullanılıp çıkan sonuçların ortalaması değerlendirilmiştir.

```
1 reference
public static void BenchmarkEncryption(byte[] templateBytes)
{
    const int ITER = 5000;

    var cbc = new EncryptionService("MY_SECRET_KEY_123456789");
    var gcm = new EncryptionServiceGcm("MY_SECRET_KEY_123456789");

    long cbcEncTicks = 0, cbcDecTicks = 0;
    long gcmEncTicks = 0, gcmDecTicks = 0;

    // ================= CBC =================
    for (int i = 0; i < ITER; i++)
    {
        Stopwatch sw = Stopwatch.StartNew();
        var enc = cbc.Encrypt(templateBytes);
        sw.Stop();
        cbcEncTicks += sw.ElapsedTicks;

        sw.Restart();
        cbc.Decrypt(enc);
        sw.Stop();
        cbcDecTicks += sw.ElapsedTicks;
    }

    // ================= GCM =================
    for (int i = 0; i < ITER; i++)
    {
        Stopwatch sw = Stopwatch.StartNew();
        var enc = gcm.Encrypt(templateBytes);
        sw.Stop();
        gcmEncTicks += sw.ElapsedTicks;

        sw.Restart();
        gcm.Decrypt(enc);
        sw.Stop();
        gcmDecTicks += sw.ElapsedTicks;
    }

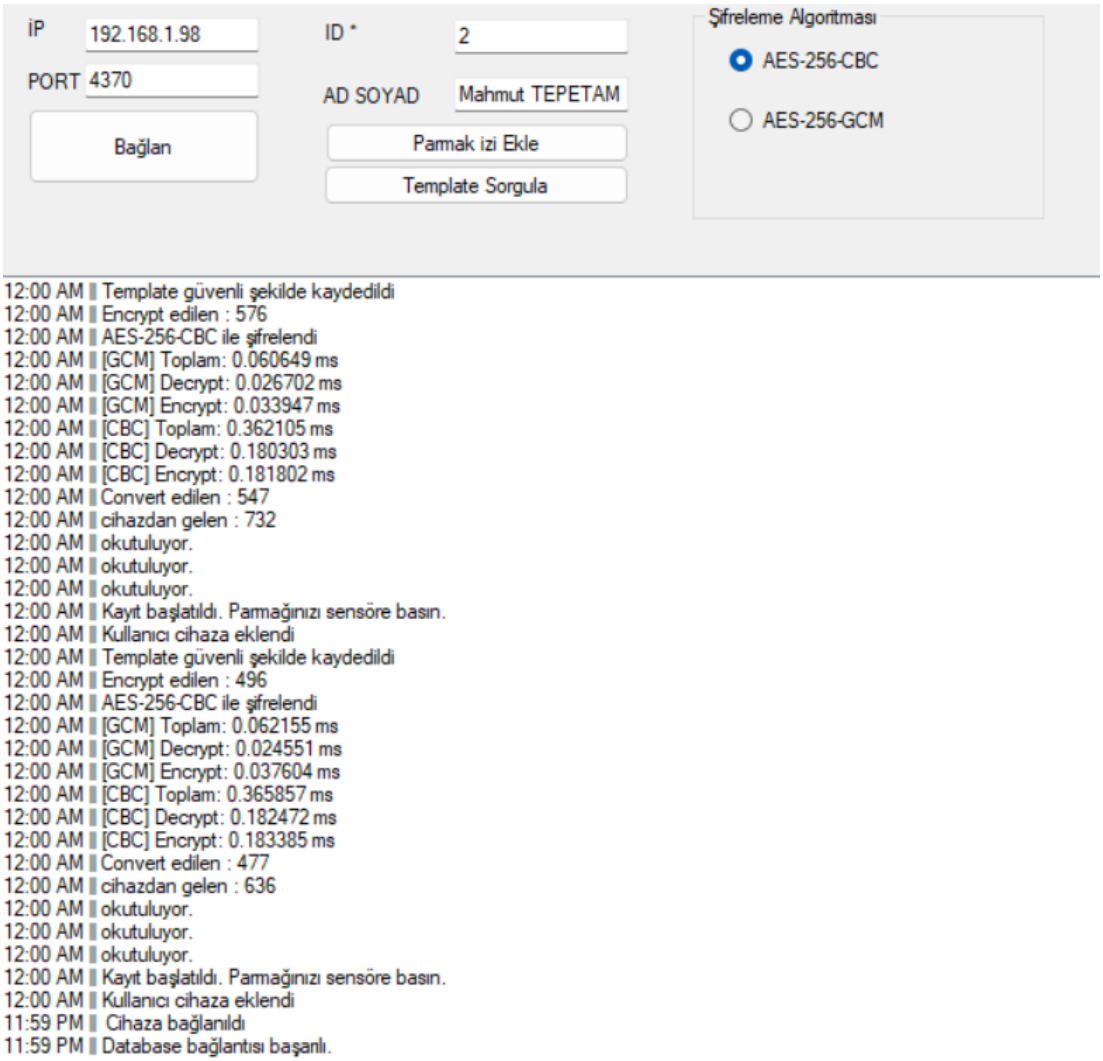
    // Ortalama tick
    double avgCbcEnc = (double)cbcEncTicks / ITER;
    double avgCbcDec = (double)cbcDecTicks / ITER;
    double avgGcmEnc = (double)gcmEncTicks / ITER;
    double avgGcmDec = (double)gcmDecTicks / ITER;
```

Yapılan benchmark işlemlerinden alınan değerler ve yapılan araştırmalar sonucunda AES-256 algoritmasında CBC modunun daha hızlı olduğu görülmüştür.

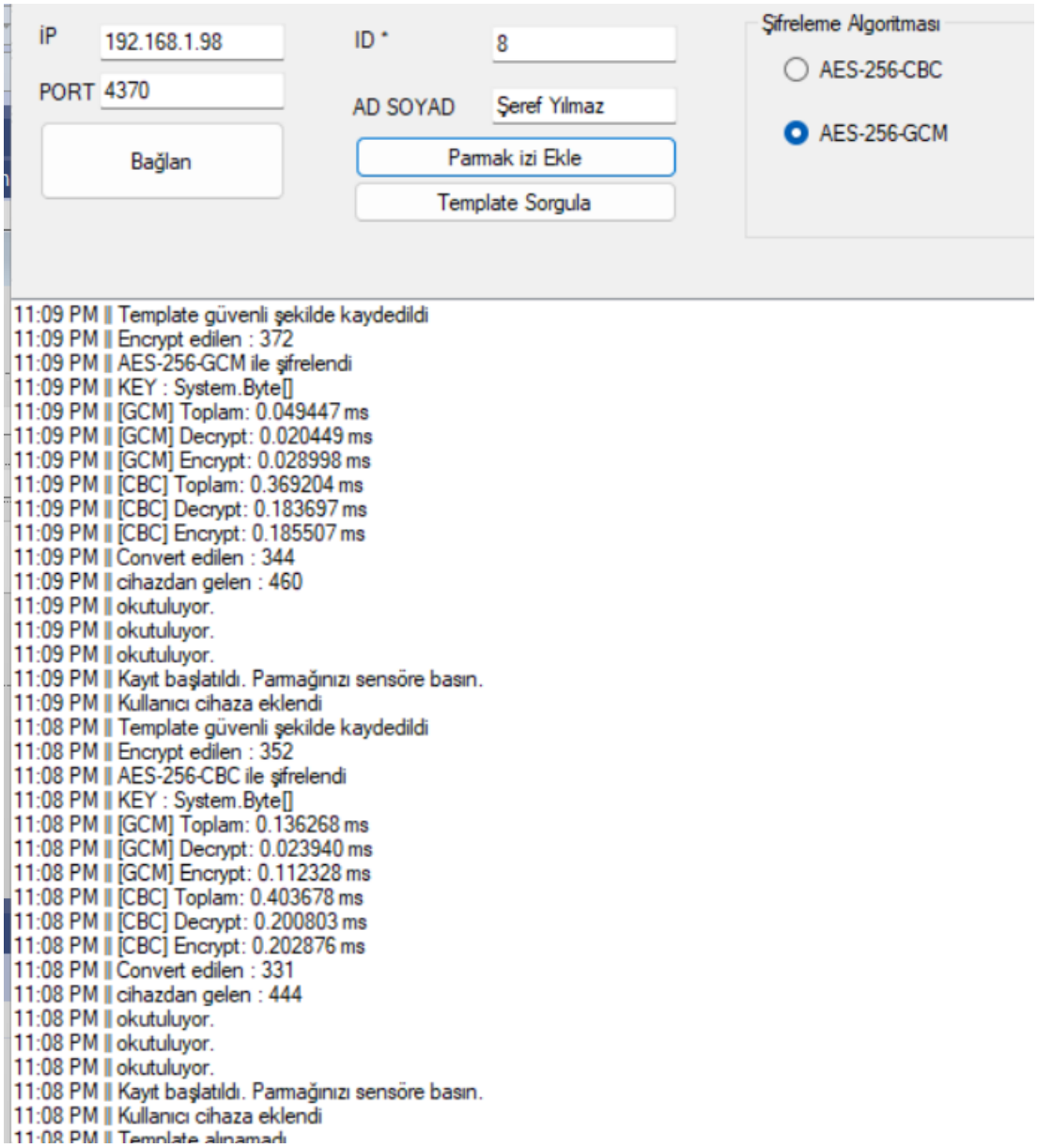
Tablo 1. Uygulamadan elde edilen veriler.

Use ID	Finger Index	Mod	Encryption	Decryption	Ham Veri	Encrypted veri
1	1	CBC	0.18ms	0.18ms	636	496
1	1	GCM	0.04ms	0.02ms	636	496
1	2	CBC	0.181ms	0.180ms	732	576
1	2	GCM	0.033ms	0.026ms	732	576
2	1	CBC	0.182ms	0.18ms	636	496
2	1	GCM	0.043ms	0.02ms	636	496
2	2	CBC	0.177ms	0.178ms	720	526
2	2	GCM	0.033ms	0.027ms	720	526
3	1	CBC	0.19ms	0.186ms	606	480
3	1	GCM	0.038ms	0.023ms	606	480
3	2	CBC	0.185ms	0.183ms	702	546
3	2	GCM	0.033ms	0.026ms	702	546
4	1	CBC	0.188ms	0.183ms	616	476
4	1	GCM	0.0401ms	0.0212ms	616	476
4	2	CBC	0.17ms	0.17ms	678	516
4	2	GCM	0.0356ms	0.027ms	678	516

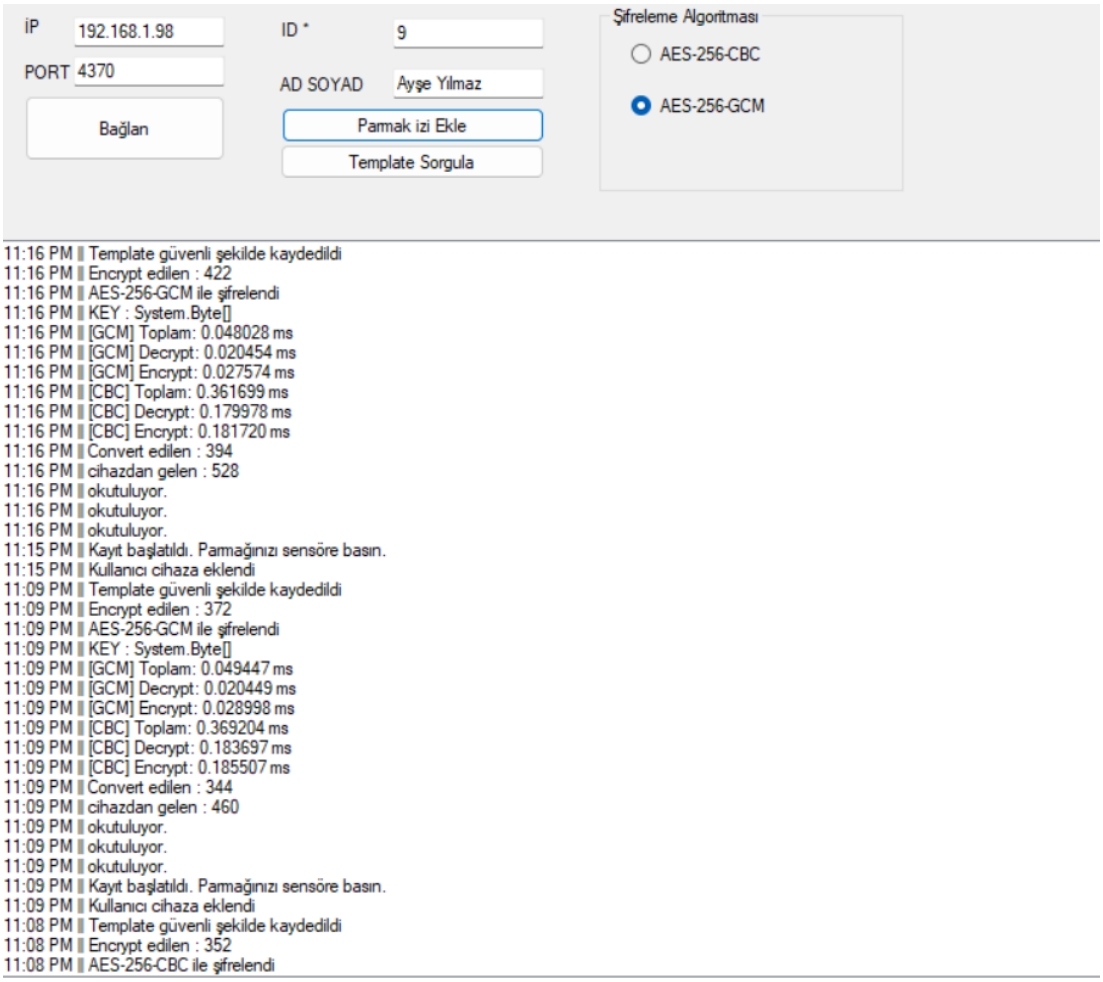
Fakat bütün olarak değerlendirildiğinde GCM modu daha güvenli olarak ön plana çıkmaktadır.



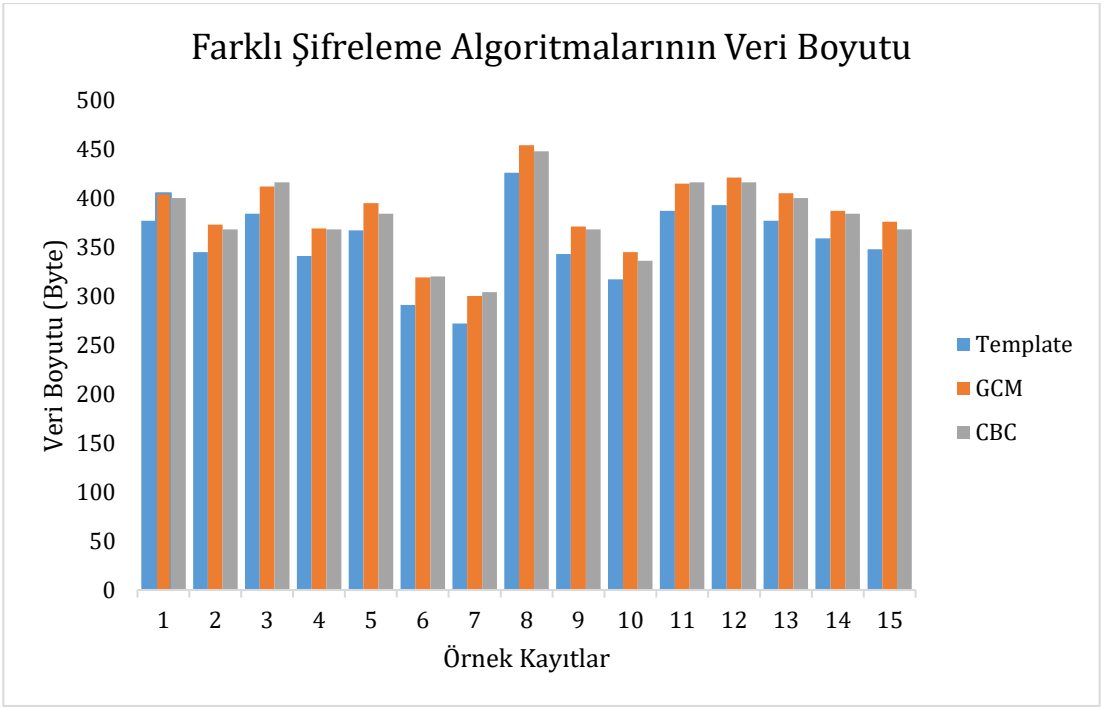
Şekil 4. Uygulama verileri.



Şekil 5. Uygulama test verileri.



Şekil 6. Uygulama test verileri.



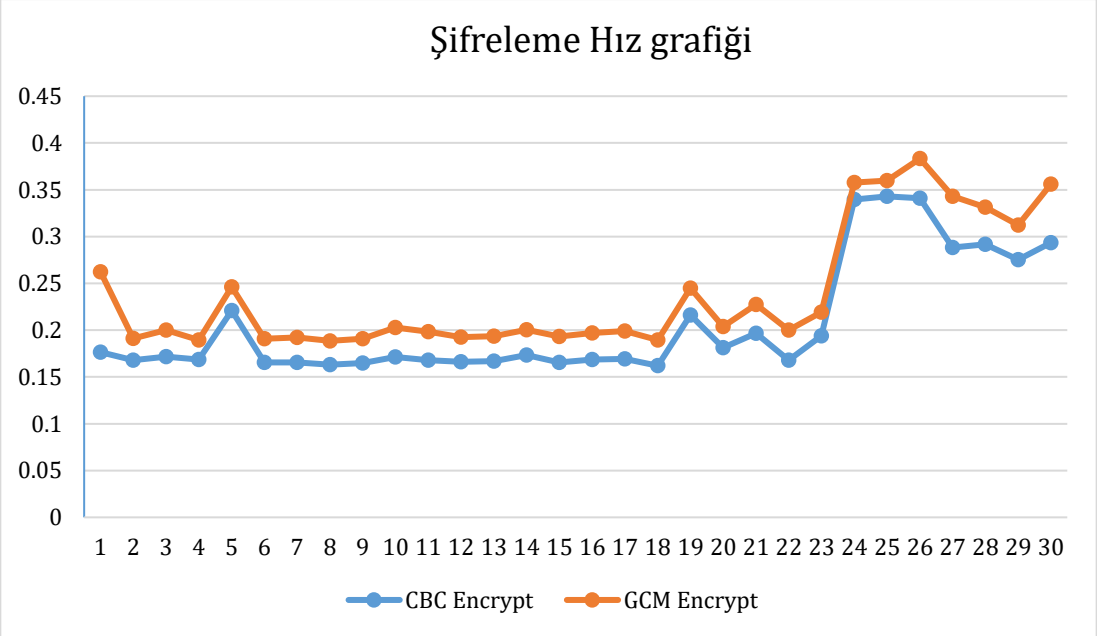
Grafik 1. Veri boyutu grafiği.

Grafikte parmak izi verilerinin Şifreleme öncesi ve sonrası veri boyutları yer almaktadır.

Bu durum, GCM modunun veriye sabit bir "overhead" (ek yük) eklediğini gösteriyor. Kriptografide bu genellikle 16 byte'lık bir **Authentication Tag** (kimlik doğrulama etiketi) ve 12 byte'lık bir **IV/Nonce** (başlatma vektörü) toplamından kaynaklanan 28 birimlik farkı temsil eder.

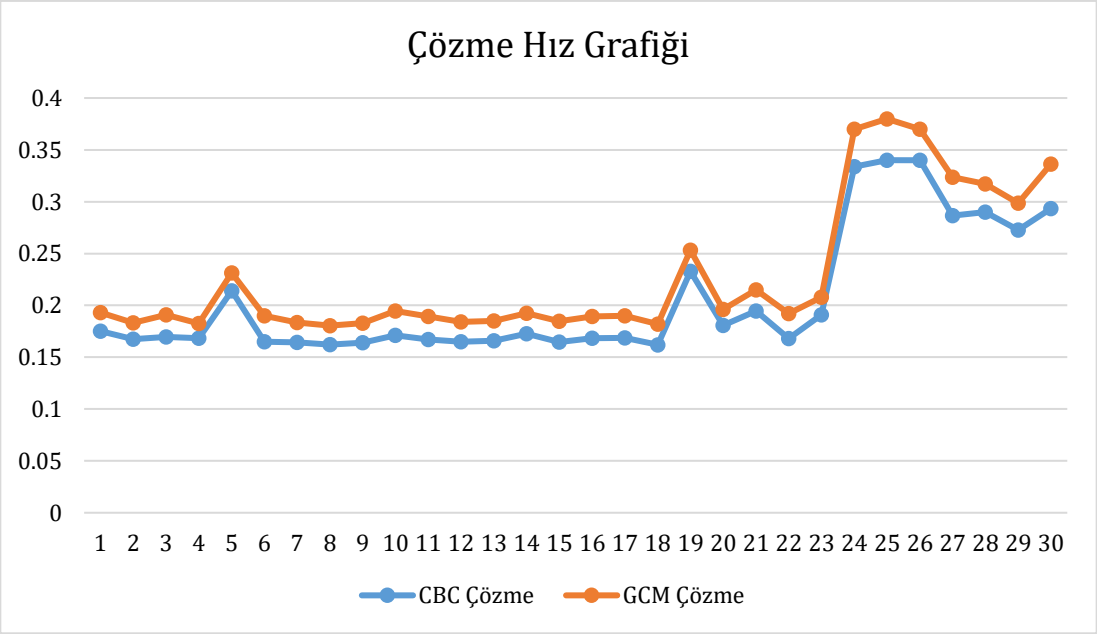
CBC değerleri genellikle **16'nın katları** (320, 336, 368, 384, 400, 416, 448 gibi) olma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Bu durum CBC'nin bir "Block Cipher" (blok şifreleyici) olduğunu ve veriyi belirli blok boyutlarına (muhtemelen 16 byte) tamamlamak için **Padding** (dolgu) kullandığını kanıtlamaktadır.



Grafik 2. Şifreleme çözme hız karşılaştırma grafiği.

Grafik 2'de parmak izi cihazından gelen ham parmak izi verilerinin CBC ve GCM modları ile şifreleme işlemleri sırasındaki hız verileri yer almaktadır.Tablo verilerine göre, **GCM modu** boyut açısından CBC ile baş başa bir performans sergilemekle birlikte (+28 sabit ek yük), işlem mimarisi gereği CBC'den **yüzde 70-80 daha hızlı** bir veri işleme kapasitesine sahiptir. CBC'de görülen **yüzde 11'e varan** dalgalı ek yükler (padding), GCM'de görülmemektedir.



Grafik 3. Şifre çözme hız karşılaştırma grafiği.

Grafik 3'te veri tabanı ortamında yer alan parmak izi verilerinin CBC ve GCM modları ile şifre çözme işlemleri sırasındaki hız verileri yer almaktadır.

GCM, CBC'ye göre ortalama yaklaşık %10–15 daha iyi performans verildiği görülmüştür.

Gelecekteki çalışmalarda AES ile fuzz fault veya homomorphic şifreleme yöntemleri kullanılarak Güvenlik seviyesi biraz daha yukarıya çıkarılabilir.

IV. TARTIŞMA

Biyometrik sistemler günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yukarıda yer alan örneklerden de anlaşılacağı gibi biyometrik sistemler veriyi saklamak için veri tabanı kullanmaktadır. Bu sistemlere yeni bir kayıt eklemek, var olan kaydı güncellemek ya da ayrılan kişiyi sistemden çıkarmak için veri tabanına bağlanıp işlemler yapmak gerekmektedir. Bu noktada veri tabanı erişimi ve güvenliği önem arz etmektedir. Verilerin ilgili yerlere güvenli bir şekilde ulaşıp ulaşmadığının teyit edilmesi gereklidir. Veri tabanı yönetim sistemlerine erişecek kişilerin belirli kimlik doğrulama yöntemleri ile erişmeleri sağlanmalı. Erişecek kişilere ihtiyaç olan minimum yetki seviyesi tanımlamalıdır. Verilerin belirli periyotlarda yedeklerinin alınması ve alınan yedeklerin belirli dönemlerde kontrol edilerek sağlıklı olup olmadığı teyit edilmelidir. Veriler saklanırken ya da silinirken kişisel verilerin korunmasında göz önünde bulundurulmalıdır. Yapmış olduğumuz uygulama ve testlerde cihazlardan veri tabanına iletişim VPN ile güvenli tünel oluşturularak sağlanmıştır. Cihazlardan alınan vektörel veriler AES şifreleme ile şifrelenerek üçüncü kişilerin parmak izi verilerine ulaşmasının önüne geçilmesi için önlem alınmıştır. Şifreleme işlemi yapılırken AES standardının GCM ve CBC modları kullanılarak iki şifreleme yöntemi arasındaki farklar da gözlemlenmiştir.

GCM modu, boyut açısından CBC ile benzer bir yapı sergilemekle birlikte, işlem mimarisi sayesinde veri işleme kapasitesi bakımından CBC'ye kıyasla yaklaşık %70–80 oranında daha hızlıdır.

Genel performans değerlendirmelerinde ise GCM'nin ortalama %10–15 seviyesinde daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Ek yük (overhead) açısından incelendiğinde, GCM modunun veriye sabit bir ek yük eklediği görülmektedir; bu değer genellikle 16 byte'lık Authentication Tag ve 12 byte'lık IV/Nonce olmak üzere toplam 28 byte'tır.

Buna karşılık CBC modunda ek yük sabit değildir ve kullanılan Padding mekanizmasına bağlı olarak yaklaşık %0 ile %11 arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca CBC'nin bir blok şifreleme modu olması nedeniyle veriyi belirli blok boyutlarına (genellikle 16 byte) tamamlamak zorunda olduğu ve bu nedenle çıktı boyutlarının çoğunlukla 16'nın katları şeklinde oluştuğu gözlemlenmektedir.

AES-GCM ve AES-CBC şifre çözme süreçleri hem kullanılan kriptografik mekanizmalar hem de güvenlik garantileri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. AES-CBC modunda şifre çözme işlemi, şifreli verinin bloklar halinde AES algoritması ile çözülmesi ve her bir blok sonucunun bir önceki şifreli blok veya başlangıç vektörü (IV) ile XOR işlemine tabi tutulması esasına dayanır. Bu süreçte, verinin doğru şekilde çözülebilmesi için padding bilgisinin kontrol edilmesi gerekmekte olup, çözme işlemi sonrasında padding baytlarının geçerliliği doğrulanmaktadır. Ancak bu doğrulama aşaması, uygulama düzeyinde farklı hata mesajları üretilmesi durumunda padding oracle saldırılarına zemin hazırlayabilmektedir. Buna karşılık AES-GCM çözme süreci, sayaç tabanlı bir mekanizma kullanarak şifreli veriyi çözmekte ve eş zamanlı olarak Galois alanı üzerinde gerçekleştirilen hesaplamalar aracılığıyla doğrulama etiketi yeniden üretmektedir. GCM modunda çözme işlemi sırasında plaintext elde edilse dahi, doğrulama etiketi başarıyla doğrulanmadan veri geçerli kabul edilmemekte ve bütünlük kontrolü zorunlu olarak gerçekleştirilmektedir.

V. ÇIKARIM

Bu yaklaşım sayesinde AES-GCM hem gizlilik hem de veri bütünlüğünü tek bir kriptografik işlem içerisinde sağlamakta ve CBC modunda karşılaşılan padding kaynaklı güvenlik zafiyetlerini ortadan kaldırmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, yazarın yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Yazar, araştırma sürecindeki değerli katkıları, rehberliği ve desteği için tez danışmanına teşekkür eder. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde herhangi bir kurum veya kuruluş tarafından mali destek sağlanmamıştır.

KAYNAKLAR

[1] National Institute of Standards and Technology, "*Advanced Encryption Standard (AES),*" FIPS PUB 197, Gaithersburg, MD, USA, Nov. 2001. [Online]. Available: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197-upd1.pdf Accessed: May 17,2026

[2] B. Schneier, *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*, New York: Wiley, 2015.

[3] J. Nielsen and T. K. Landauer, "A mathematical model of the finding of usability problems," in *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 1993, pp. 206–213.

[4] R. A. Virzi, "Refining the test phase of usability evaluation: How many subjects is enough?" *Hum. Factors*, vol. 34, no. 4, pp. 457–468, 1992.

[5] T.C. Resmî Gazete, "Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerin Tanımı, Nitelikleri ve Sınıflandırılması Hakkında Yönetmelik," 25 Mayıs 2023, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/05/20230525-6.pdf

[6] ZKTeco Inc., "ZK Finger SDK Documentation," https://www.zkteco.com/en/SDK (accessed 2026, 17 May)

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Transformer Tabanlı Dil Modelleri Kullanılarak Sahte Haberlerin Tespiti Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma

Mitra Malekzad, Fatih Kayaalp*

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** mitra.malekzad@gmail.com

ÖZET

Yalan haberler yeni bir sorun olmasa da, dijital haber dağıtım platformlarının kolaylaştırdığı haber yayılımının hacmi ve hızındaki artış nedeniyle konunun karmaşıklığı önemli ölçüde artmıştır. Dönüştürücü tabanlı dil modellerindeki son gelişmeler, metin sınıflandırma görevlerindeki performanslarını önemli ölçüde artırmıştır. Ancak bu modellerin etkinliği, veri setinin dengeli olup olmadığına bağlı olarak değişebilir. Bu çalışmada, popüler dönüştürücü tabanlı dil modelleri olan BERT, ALBERT, RoBERTa, ModernBERT ve XLM-RoBERTa'nın sahte haberleri tespit etme performansları, ISOT, BuzzFeed ve WELFake gibi yaygın olarak kullanılan dengeli veri kümeleri üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Modellerin sınıflandırma performansları, doğruluk, kesinlik, geri çağırma ve F1 puanı gibi metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tüm modellerin ISOT'ta neredeyse kusursuz bir performans gösterdiğini (doğruluk oranı %99, F1 skoru %99); BuzzFeed'de ise XLM-RoBERTa (%86 doğruluk, %86 F1 skoru) diğer modellerden daha iyi performans göstermiştir; ayrıca RoBERTa, ISOT ve WELFake'de neredeyse mükemmel doğruluk elde ederken, BuzzFeed'de de rekabetçi sonuçlar elde ederek güçlü ve tutarlı bir performans sergilemiştir. Bu çalışma, listelenen dönüştürücü tabanlı modellerin çok sayıda dengeli veri seti üzerinde karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, dönüştürücü tabanlı dil modellerinin dengesiz veri setlerinde sahte haberleri tespit etmedeki performanslarının araştırılması planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sahte haber tespiti, BERT, ALBERT, RoBERTa, XML-RoBERTa.*

A Comparative Study on Fake News Detection Using Transformer-Based Language Models

Mitra Malekzad, Fatih Kayaalp*

Düzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.
* **Corresponding Author:** mitra.malekzad@gmail.com

ABSTRACT

While fake news is not a new problem, the complexity of the issue has increased significantly due to the rise in the volume and speed of news dissemination facilitated by digital news distribution platforms. Recent advancements in transformer-based language models have significantly improved their performance in text classification tasks. However, the effectiveness of these models can vary depending on whether the dataset is balanced or not. In this study, the performances of popular transformer-based language models—BERT, ALBERT, RoBERTa, ModernBERT, and XLM-RoBERTa—in detecting fake news is comparatively analyzed on widely used balanced datasets such as ISOT, BuzzFeed, and WELFake. The models' classification performances were evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score. The results show that all models performed nearly flawlessly on the ISOT (99% accuracy, 99% F1-score); on the BuzzFeed, the XLM-RoBERTa (86% accuracy, 86% F1-score) outperformed the other models; and that RoBERTa, while achieving nearly perfect accuracy on the ISOT and WELFake, maintained competitive results on the BuzzFeed, demonstrating strong and consistent performance. This study presents a comparative analysis of listed transformer-based models across multiple balanced datasets. Investigating the

performances of transformer-based language models in detecting fake news on imbalanced datasets is planned as future work.

Keywords: *Fake news detection, BERT, ALBERT, RoBERTa, XML-RoBERTa*.

I. INTRODUCTİON

The spread of fake news has become a crucial problem with the rapid spread of fake in the recent years. The risk of exposure to misleading or false content created for political or enconomic purposes increases by these platforms which allow information to be shared quickly but what makes it serious threat is that fake news spreads faster and reaches a wider audience than reliable information in the modern society. As a result, detecting fake news has become an important and challenging task.

Despite many approaches which has been proposed for detecting of fake news, still the task is challenging because of the differences between fake news datasets and news content. Specially, the performance of models can vary depending on the characteristics of dataset.

Overall, there are two main approaches which existence studies focus on, one is content-based approaches which analyze textual information and the other one is social-context-based approaches [1], [2],[3]. On the other hand, because of the short, noisy and disjointed nature of social media content, relying on textual information is challenging [4].

Recently, there has been major improvement in transformer-based language models, like BERT and its variants by showing strong performance in text classification tasks as an example, BERT, with its bidirectional context understanding, can grasp deeper meanings from text and this makes it a powerful model for various NLP tasks [4]. These models are mostly used for detecting fake news because of their ability to capture contextual information in text.

In this study, we perform a comparative analysis of several transformer-based models, including BERT, ALBERT, RoBERTa, ModernBERT, and XLM-RoBERTa, on three benchmark balanced datasets: ISOT, BuzzFeed, and WELFake, then the accuracy, precision, recall, and F1-score metrics is used to evaluate the models. Additionally, we also compare the characteristics of these datasets. Whereas, ISOT and BuzzFeed are single-source datasets, WELFake is created by combining multiple news sources. Using this comparison, we can analyze model behavior across both single-source and mixed-source date. The main contribution of this study is the comparative evaluation of multiple transformer-based models across different balanced datasets, identify models which provide consistent and robust result and provides insights into their performance variability as well.

This paper is organized as follows. Section 2 reviews the existing literature on fake news detection and transformer-based approaches. Section 3 describes the methodology. Section 4 presents the experimental results. Section 5 discusses the findings and outlines potential directions for future work. Finally, Section 6 concludes the paper

II. RELATED WORKS

Fake news detection has become a major problem in recent years, and several methods have been proposed for detecting fake news using different datasets. currently three approaches are used to detect fake news detection, propagation-based, source analysis, and content-based research. According to the propagation map, these distribution patterns will include news as false or true [5]. Source-based approaches analyze contextual and structural patterns of news content for early detection [6] and finally, content-based relies on the detection of both lexical and syntactic linguistic characteristics. It assumes that fake articles are formulated using syntactic and deceptive language [7,8,9,10,11].

With the advancement of deep learning, neural network-based approaches have become more prominent. Models such as Recurrent Neural Networks (RNNs), Long Short-Term Memory (LSTM) networks, and attention-based architectures have been used to capture contextual and sequential information in text [12], [13], [14].

Recently, transformer-based models, specially, BERT and its variants, have achieved top performance in natural language processing tasks. These models improve performance using contextual embeddings and transfer learning [14], [15]. In the context of fake news detection, BERT-based models have been shown to outperform traditional approaches, even with minimal feature engineering [16], [17].

Additionally, multiple works used social context information, like user interactions and propagation patterns, to improve detecting fake news. In order to provide stronger identification signals rather than content alone these approaches use source of information such as user responses and network structures.[18], [19], [20]. At the same time, such methods depend on the availability of user interaction data and may not be suitable for real-time detection scenarios.

With all improvements in this area, performance of models mostly depends on dataset characteristics, and results reported on one dataset may not generalize well to others. Particularly, deep learning models showed strong performance on datasets like ISOT, by achieving high accuracy scores [21], [22], [23]. All the reason above proves the need for comparative studies that evaluate different models across multiple datasets to better understand their robustness and generalization capabilities.

III. METHODOLOGY

A. Datasets

As this study focuses on fake news detection using textual features, three benchmark datasets has been selected, first one is WELFake, second BuzzFeed, and the last one ISOT datasets. The reason they are chosen is their different size, source diversity, and also level of complexity. Table 1 presents the overall statistics of the datasets, including the number of samples and distribution of fake and real news.

1. *WELFake Dataset*

The WELFake dataset consists of 72,134 news articles, with 35,028 real and 37,106 fake samples, which is constructed by combining multiple datasets, like, Kaggle, McIntire, Reuters, and BuzzFeed Political, to reduce overfitting and improve generalization. Each record includes a title, text content, and label (1 for fake and 0 for real). Additionally, as it is multi-source and large size, so it provides a more diverse and realistic dataset for training and evaluation.

2. BuzzFeed Dataset

The BuzzFeed Political dataset is a small in size and also balanced dataset which contains182 news articles, including 91 fake and 91 real samples. It is considered a challenging dataset due to the similiarity in writing style so the models often experience a decreases on performance on this dataset and this making it useful for evaluating model robustness and generalization.

3. ISOT Dataset

In 2017, Ahmed et al. introduced the ISOT fake news dataset [21] containing 45k full length articles from real world sources, with real articles collected from Reuters.com and fake articles collected from various unreliable sources. Fake news articles in this dataset were identified and sourced from Politifact.com, a not-for-profit national news organization that uses human fact-checkers to identify fake news, largely focusing on political news. This dataset therefore mainly contains news articles relating to the 2016 US presidential election and has been widely used in fake news detection studies in this field [21], [22], [23], [24].

Due to clear stylistic and structural differences between real and fake news, this dataset is often considered relatively easy for classification tasks. Consequently, most models achieve very high performance on this dataset, making it suitable as a baseline benchmark.

Table 1. Dataset statistics

Dataset	Total Samples	Fake News	Real News
ISOT	44,898	21,417	23,481
WELFake	72,134	37,106	35,028
BuzzFeed	182	91	91

B. *Data preprocessing:*

In this study, text preprocessing is performed to reduce noise, to improve data quality, and also to ensure compatibility with our transformer-based models. The preprocessing steps include basic data cleaning, tokenization, and input preparation. First of all, for datasets which containing both title and content fields, are combined into a single text input to provide richer contextual information for the model.

As second step the, tokenization is performed using the HuggingFace tokenizer, which applies subword tokenization to convert text into model-compatible tokens. Here all input sequences are padded and truncated to a fixed length for having a uniform input size. Additionally, for improving data quality the missing values are removed as well.

C. Data Splitting

In this experiment, the dataset is divided into training, validation, and test sets as the first, 20% of the data is reserved for testing, the remaining 80% is further split to create a validation set so final split of 72% training, 8% validation, and 20% testing. Here Stratified sampling is used to preserve the class distribution across all subsets.

D. Models

In this study, several transformer-based language models are implemented and evaluated to understand how their performance varies across different datasets. The models considered in this work are BERT,

ALBERT, RoBERTa, ModernBERT, and XLM-RoBERTa. The reason for selecting these models are because of their strong performance in natural language processing tasks and also their ability to capture contextual information within text.

BERT is one of the most widely used model among all for language understanding tasks. It is based on a bidirectional transformer architecture, which allows it to consider both the left and right context of words simultaneously to helps the model better capture the meaning of text. The other models used in this study are also built on transformer architectures, with certain improvements or variations. For example, ALBERT mostly focuses on reducing model size through parameter sharing, for better performance the RoBERTa improves the training process, and XLM-RoBERTa extends the model to support multilingual data.

All models are initialized using pre-trained weights and then fine-tuned on the selected datasets for the task of binary classification (fake vs. real news). During this process, a classification layer is added on top of each model, and the entire network is trained using labeled data.

For having a fair comparison, all models are trained under the same experimental settings, including identical preprocessing steps, input sequence length, and training parameters. This consistent setup allows for a more reliable comparison of their performance across different datasets.

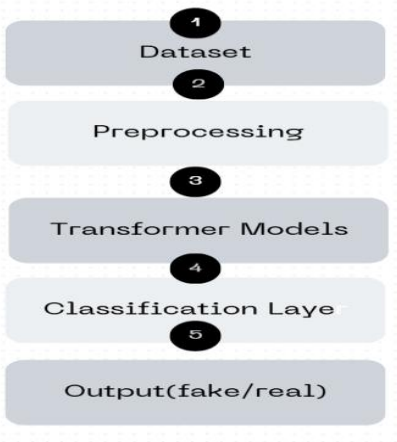


Figure 1. Overview of the proposed transformer-based fake news detection pipeline

E. Training Setup

To have a fair comparison across all the experiment, the models used in this study are fine-tuned using a consistent training setup. AdamW optimizer is used to train all the models, which is widely adopted for fine-tuning pre-trained language models because of its stable convergence and regularization.

Due to GPU memory limitations a batch size of 8 is selected in this work along with stable and efficient training. Here we determined the optimal number of training epochs separately for each dataset using validation performance and because of differences in dataset size and complexity of data, the optimal epoch varied across datasets. Particularly, smaller datasets like BuzzFeed showed high sensitivity to overfitting, so it required fewer epochs, on the other hand larger datasets such as WELFake worked better on longer training epoch. As shown in Table 2, the epoch-wise validation results for the XLM-RoBERTa model on the WELFake dataset, model performance improves during the initial epochs and reaches its peak at the fourth epoch., achieving the lowest validation loss and highest F1-score. Further training leads to an increase in validation loss, indicating the onset of overfitting. Therefore, the number of epochs is set to 4.

All models are trained under the same conditions to ensure that performance differences are because of the model architecture not variations in training configuration. Python used for implementation of the experiments using the PyTorch framework and the HuggingFace Transformers library. Also we used Google Colab which is a GPU_enabled environment for training and evaluation, which enables efficient computation and faster model training.

Table 2. Effect of training epochs on validation performance using XLM-RoBERTa on the WELFake dataset.

Epoch	Train Loss	Val Loss	Val Acc	Val F1
1	0.1249	0.0404	0.9895	0.9895
2	0.0382	0.7125	0.8821	0.8804
3	0.0186	0.4417	0.9549	0.9548
4	0.0093	**0.0387**	**0.9939**	**0.9939**
5	0.0034	0.0559	0.9935	0.9935

F. Evaluation Metrics

In this study several standard classification metrics are used to evaluate the performance of our models, which includes accuracy, precision, recall, and F1-score. These metrics provide a comprehensive understanding of how well the models distinguish between fake and real news.

Overall correctness of the model is measured by Accuracy which is by calculating the proportion of correctly predicted samples. Precision metrics shows how many of the samples predicted as fake news are actually fake, while recall measures how well the model is able to identify all fake news instances.

The F1-score, which is the harmonic mean of precision and recall, is also reported as it provides a balanced measure of performance, especially when dealing with class distributions. Using multiple evaluation metrics ensures a more reliable and fair assessment of model performance across different datasets.

IV. Results and Discussion

Table 3 presents the overall performance of the transformer-based models across the ISOT, WELFake, and BuzzFeed datasets. The evaluation is based on accuracy, precision, recall, and F1-score, which allowes a detailed comparison of how the models behave on datasets with different characteristics.

Table 3. Model-Based Comparison Across Datasets

Model	ISOT		WELFake		BuzzFeed	
	Accuracy	**F1-score**	**Accuracy**	**F1-score**	**Accuracy**	**F1-score**
BERT	99.90%	99.80%	99.41%	99.42%	78.38%	78.23%
ALBERT	99.95%	99.92%	99.55%	99.54%	83.78%	83.68%
RoBERTa	99.98%	**99.99%**	**99.94%**	**99.94%**	83.78%	83.48%
ModernBERT	**99.99%**	99.98%	99.88%	99.88%	81.08%	81.03%
XLM-RoBERTa	99.97%	99.93%	99.47%	99.47%	**86.49%**	**86.45%**

As shown above, for the ISOT dataset, all models achieve almost perfect results, with accuracy ranging from 99.90% to 99.99% and F1-scores very close to 1.0. ModernBERT shows the highest accuracy, reaching 99.99%, at the same time RoBERTa and XLM-RoBERTa also perform at a very similar level. Precision and recall values are nearly identical for both fake and real classes, which shows that the models can distinguish between the two classes with very high confidence. Based on the results ISOT is a relatively easy dataset, where the differences between fake and real news are clear.

On the other hand we can see the similar pattern for the WELFake dataset, where all models again achieve very high performance, with accuracy values above 99%. RoBERTa slightly outperforms the other models, followed closely by ModernBERT. The remaining models also maintain very high precision, recall, and F1-scores. although, WELFake is collected from multiple sources, the models are still able to learn its patterns effectively and makes less challenges.

BuzzFeed dataset shows totally different result, the accuracy here decreases to a range between 78.38% and 86.49%, showing that this dataset is more difficult. Among the models, XLM-RoBERTa achieves the best performance, while ALBERT and RoBERTa follow closely. BERT and ModernBERT show comparatively weaker results. The precision, recall, and F1-scores here are lower here than the other datasets, which this shows that the distinction between fake and real news is less clear. This makes BuzzFeed a more realistic benchmark, where models need stronger generalization ability.

Overall, while the models perform very similarly on easier datasets like ISOT and WELFake, their differences become more visible on a challenging dataset such as BuzzFeed. XLM-RoBERTa stands out as the most robust model in this case, while RoBERTa maintains strong and consistent performance across all datasets.

These results emphasize the importance of testing models on datasets with different levels of difficulty. Only high accuracy on a single dataset does not necessarily mean that the model will perform well in real-world practices, as the data is more often complex and less or unstructured.

As shown in Table 4, in addition to evaluating model performance, efficiency of each model is also important to be considered. Based on the results models such as RoBERTa and XLM-RoBERTa achieve higher accuracy and F1-scores, they are relatively large and require more computational resources.

On the other hand, ALBERT offers a more efficient alternative by significantly reducing model size while still maintaining performance close to BERT. BERT itself serves as a baseline model in this study, but its performance is comparatively weaker on more challenging datasets such as BuzzFeed.

Overall, these results highlight a clear trade-off between model size and performance. As indicated in Table 4, Larger models tend to perform better, especially on difficult datasets, while more efficient models provide a practical balance between computational cost and accuracy. This consideration is particularly important for real-world applications where resource limitations may affect model selection.

Table 4. Efficiency vs performance comparison

Model	Size / Efficiency	Performance Summary
BERT	Large	Baseline model, weaker on challenging data
ALBERT	Very efficient	Comparable to BERT with much smaller size
RoBERTa	Large	Best overall performance across datasets
ModernBERT	Large	Strong performance but slightly less stable

V. Conclusion

This study presented a comparative analysis of several transformer-based models, including BERT, ALBERT, RoBERTa, ModernBERT, and XLM-RoBERTa, for fake news detection across three datasets: ISOT, WELFake, and BuzzFeed. Our main goal and objective were to understand how these models perform under different dataset conditions and to identify which models are more consistent and reliable.

The results show that all models perform extremely well on datasets such as ISOT and WELFake, achieving near-perfect accuracy and F1-scores. However, the performance drops noticeably on the BuzzFeed dataset, which appears to be more challenging and closer to real-world scenarios. This highlights that high performance on a single dataset does not necessarily reflect a model's ability to generalize well.

Among the evaluated models, RoBERTa demonstrates strong and consistent performance across all datasets, while XLM-RoBERTa shows better generalization on the more difficult dataset. ALBERT provides a more efficient alternative with competitive results, while BERT, although reliable, performs slightly weaker compared to the other models.

Overall, this study emphasizes the importance of evaluating models on multiple datasets with varying levels of difficulty. It also highlights the trade-off between model performance and efficiency, which is an important factor in real-world applications.

VI. Future Work

It would be valuable to extend this analysis to imbalanced datasets and explore the impact of different data distributions on model performance. Additionally, incorporating explainable AI (XAI) techniques could provide further insights into how these models make decisions.

References

[1] X. Zhou et al., Fake news early detection: A theory-driven model, Digital Threats: Research and Practice, vol. 1, no. 2, pp. 1–25, 2020.
[2] M. Albahar, A hybrid model for fake news detection: Leveraging news content and user comments, IET Information Security, vol. 15, no. 2, pp. 169–177, 2021.
[3] K. Shu et al., Beyond news contents: The role of social context for fake news detection, Proc. ACM WSDM, pp. 312–320, 2019.
[4] J. Devlin et al., BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, arXiv:1810.04805, 2018.
[5] S. Vosoughi et al., The spread of true and false news online, Science, vol. 359, no. 6380, pp. 1146–1151, 2018.
[6] R. Baly et al., Predicting factuality of reporting and bias of news media sources, arXiv:1810.01765, 2018.
[7] V. Pérez-Rosas et al., Automatic detection of fake news, Proc. COLING, pp. 3391–3401, 2018.
[8] S. Afroz et al., Detecting hoaxes, frauds, and deception in writing style online, Proc. IEEE S&P, pp. 461–475, 2012.
[9] V. Rubin et al., Fake news or truth? Using satirical cues, Proc. Workshop Deception Detection, pp. 7–17, 2016.
[10] H. Rashkin et al., Truth of varying shades, Proc. EMNLP, pp. 2931–2937, 2017.
[11] M. Potthast et al., A stylometric inquiry into hyperpartisan and fake news, Proc. ACL, 2018.
[12] L. Borges et al., Deep representation learning for stance detection, JDIQ, 2019.
[13] Y. Long et al., Fake news detection through speaker profiles, IJCNLP, pp. 252–256, 2017.
[14] S. Bajaj, Fake news detection using deep learning, 2017.
[15] S. González-Carvajal and E. Garrido-Merchán, Comparing BERT with traditional ML, arXiv:2005.13012, 2020.
[16] A. Radford et al., Improving language understanding by generative pre-training, 2018.
[17] A. Aggarwal et al., Fake news classification using transformers, 2020.
[18] J. Y. Khan et al., Benchmark study of fake news detection models, Machine Learning with Applications, vol. 4, 2021.
[19] M. K. Dalal and M. A. Zaveri, Automatic text classification: A review, Int. J. Computer Applications, vol. 28, no. 2, pp. 37–40, 2011.
[20] L. Deng and Y. Liu, Deep learning in natural language processing, Springer, 2018.
[21] H. Ahmed et al., Detection of online fake news using n-grams, Springer, 2017.
[22] S. A. Alameri and M. Mohd, Fake news detection using ML and DL, IEEE CRC, 2021.
[23] J. A. Nasir et al., Hybrid CNN-RNN fake news detection, IJIM Data Insights, vol. 1, no. 1, 2021.
[24] S. Hakak et al., Ensemble ML approach for fake news classification, Future Generation Computer Systems, vol. 117, pp. 47–58, 2021.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Yazlık Triko Giysiler İçin Sinek Kovma Özelliklerinin Geliştirilmesi

Melike Kantarcıoğlu[a], Onur Balcı[b], Koray Pektaş[b], Duygu Macat[c], Mustafa Akıner[d], Yeşim Çat[e]*

[a]İntem Triko Ar-Ge Merkezi, Malatya / Türkiye.
[b]Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye.
[c]İntem Triko Tasarım Merkezi, İstanbul /Türkiye.
[d]Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Rize/Türkiye.
[e]Parkim Fragrance House, İstanbul/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** melike.kantarcioglu@intemtriko.com

ÖZET

Sinek kovma performansı çeşitli kozmetik malzemelerin cilde sürülmesi vasıtasıyla sağlanan bir performanstır. Özellikle yaz aylarında önem kazanan bir ihtiyaçtır. Ancak deriye sürülmesi gerekliliği kullanımı zorlaştırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, poliamid, yün ve akrilik elyaf içeriğine sahip triko giysilere mikroenkapsülasyon yöntemi ile elde edilmiş doğal ve sentetik esansiyel yağların ürünleri uygulanarak sinek kovucu özellik kazandırılması amaçlanmıştır. Çalışmada aktif madde olarak formaldehit bazlı polimerik kabuk yapısına sahip iki farklı ticari mikrokapsül kullanılmıştır. Geliştirilen hazır kapsül süspansiyonları triko yüzeylere sprey yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. Böylece esansın kontrollü salınım göstermesi ve tekstil yüzeyinde daha uzun süre etkin kalması hedeflenmiştir. Çalışmada ayrıca mikrokapsül uygulamasının triko kazakların sinek kovma performansları ve kullanım konforu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, sinek kovma performans açısından etkili, kullanıcı sağlığına zarar vermeyen ve ticarileştirme potansiyeline sahip fonksiyonel bir yazlık triko kazak geliştirilmesi hedeflenmektedir. geliştirilen fonksiyonel yazlık triko yüzeylerin Dünya Sağlık Örgütü (WHO) standartlarına göre %97,9 ile %100 arasında son derece yüksek ve kararlı bir sinek kovma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Geliştirilen ürün, kullanıcı sağlığına zarar vermeyen ve ticarileştirme potansiyeline sahip inovatif bir yazlık triko giysi prototipidir.

Anahtar Kelimeler: *Esans, Yağ, Mikroenkapsülasyon, Triko, Sinek kovma, Aplikasyon.*

Development of Insect-Repellent Properties for Summer Knitwear Garments

ABSTRACT

Mosquito-repellent performance is typically achieved by applying various cosmetic products to the skin. This is a need that becomes particularly important during the summer months. However, the requirement for direct skin application makes its use less convenient. Within the scope of this study, it was aimed to impart mosquito-repellent properties to knitted garments containing polyamide, wool, and acrylic fibers by applying products obtained through the microencapsulation of natural and synthetic essential oils. Two different commercial microcapsules with a formaldehyde-based polymeric shell structure were used as active agents in the study. The developed ready-to-use capsule suspensions were applied to knitted surfaces using a spray method. In this way, controlled release of the fragrance and longer-lasting effectiveness on the textile surface were targeted. The study also evaluated the effects of microcapsule application on the mosquito-repellent performance and wearing comfort of knitted sweaters. As a result of the study, the goal was to develop a functional summer knitted sweater with effective mosquito-repellent performance, no harmful effects on user health, and strong commercialization potential. It was determined that the developed functional summer knitted surfaces exhibited extremely high and stable mosquito-repellent performance, ranging from 97.9% to 100% according to World Health Organization (WHO) standards. The developed product is an innovative summer knitted garment prototype that is safe for user health and has significant commercialization potential.

Keywords: *Fragrance, Oil, Microencapsulation, Knitwear, Mosquito repellent, Application.*

I. GIRIŞ

Triko tekstil ürünleri; hafiflikleri, esneklikleri ve vücut hareketlerine uyum sağlayan yapıları sayesinde kullanıcıya yüksek hareket serbestliği ve termofizyolojik konfor sunan "ikinci bir deri" gibi tercih edilmektedir [1, 2, 3]. Bu yapılar, özellikle fiziksel aktiviteler sırasında vücudun ısıl dengesini koruyarak hava ve nem transferini optimize etme yeteneğine sahiptir [2, 4]. Ancak çevresel faktörlere bağlı olarak, özellikle sıcak iklimlerde sivrisinek kaynaklı sıtma, dang humması ve Zika gibi vektör kaynaklı hastalıkların yayılımı global bir sağlık tehdidi oluşturmaya devam etmektedir [5, 6]. Sivrisineklere karşı kişisel korunmada sıklıkla kullanılan N, N-dietil-meta-toluamid gibi sentetik kovucuların; cilt irritasyonu, alerjik reaksiyonlar ve nörolojik yan etkiler gibi dezavantajları bulunmaktadır [6, 7]. Ayrıca bu kimyasalların kokusu ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri, bitkisel kökenli uçucu yağlar gibi daha güvenli ve sürdürülebilir alternatiflerin kullanımını teşvik etmiştir [6, 8]. Limon otu (lemongrass), okaliptüs, biberiye ve mentol gibi uçucu yağlar, içerdikleri fitokimyasallar sayesinde sivrisineklerin koku alma sistemini kapatarak insanın yerini tespit etmelerini engelleyen doğal bir bariyer oluşturmaktadır [7, 9]. Uçucu yağların yüksek volatilitesi (uçuculuğu), tekstil yüzeylerindeki kalıcılıklarını ve etkinlik sürelerini kısıtlamaktadır [10]. Bu sorunu aşmak için kullanılan mikroenkapsülasyon teknolojisi, aktif bileşenlerin dış çevreden korunmasını ve basınç ya da sürtünme ile tetiklenen kontrollü salım sayesinde koruma süresinin uzatılmasını sağlamaktadır [6, 11]. Polimerik kabuk yapılarının oluşturulmasında emülsiyon polimerizasyonu teknikleri, yüksek kapsülleme verimliliği ve yıkama dayanımı elde etmek için literatürde öne çıkan yöntemler arasındadır [12]. Pamuk, polyester ve bunların karışımlarından oluşan tekstil yüzeylerine uygulanan bu fonksiyonel bitiş işlemleri, sivrisineklere karşı %90'ın üzerinde koruma sağlayabilmektedir [6, 9]. Geliştirilen bu kumaşların sinek kovucu performansları, Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen "Y-tüp olfaktometre" veya modifiye edilmiş test protokollerine göre analiz edilerek bilimsel olarak doğrulanmaktadır [5, 13].

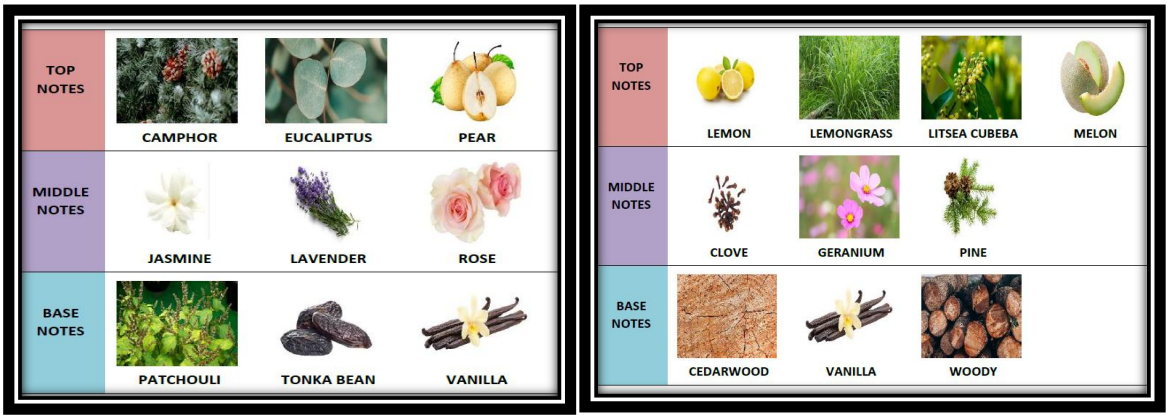
II. MATERYAL METOT

Sinek kovucu özellik kazandırılmış fonksiyonel triko giysilerin geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan tüm numuneler, %40 poliamid, %30 yün ve %30 akrilik elyaf karışımına sahip ipliklerden üretilmiştir. Belirlenen elyaf kompozisyonu; poliamidin dayanım özelliği, yünün konfor ve ısıl özellikleri ile akriliğin hafiflik avantajlarından eş zamanlı yararlanmak amacıyla tercih edilmiştir. Üretilen triko yapılar, hazır fonksiyonel mikrokapsüllerin uygulanacağı temel tekstil yüzeyi olarak kullanılmıştır.

Çalışmada Parkim Fragrance House firmasından ticari olarak temin edilen hazır mikroenkapsüle sistemler kullanılmıştır. Bu kapsamda Şekil 1'de içeriği gösterilen 140205 Repellent Capsule ve 140206 Lavender Aromatic kodlu mikrokapsüller tercih edilmiştir. Kullanılan sistemlerin aktif bileşen olarak yüksek saflıkta aromatik yağlar içerdiği ve emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile üretildiği belirtilmiştir. Ayrıca kapsül stabilitesinin artırılması ve kontrollü salım mekanizmasının sağlanması amacıyla formaldehit bazlı polimerik kabuk yapısı kullanılmıştır.

A. Mikrokapsüllerin Enkapsülasyon Prosedürü ve Mekanizması

Çalışmada kullanılan esansiyel ve repellent esaslı hazır mikrokapsüllerin üretiminde; aktif madde (esans), deiyonize su ve melamin-formaldehit ko-polimeri temel bileşenler olarak yer almaktadır. Esansların kapsüllenmesi süreci, su içinde yağ (O/W) emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak polimer çözeltisi distile (deiyonize) su içerisinde hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti tamamen berrak bir görünüme kavuştuktan sonra, su içinde yağ emülsiyon polimerizasyonunun başlatılması amacıyla reaksiyon karışımına melamin-formaldehit reçinesi ve ilgili esans bileşenleri eklenmiştir. Sistemin tam anlamıyla dengeye gelebilmesi için karışım belirli bir devirde (rpm) karıştırılmıştır. Ardından, reaksiyon ortamının pH'ı hassas bir şekilde kontrol edilerek belirlenen süre zarfında polimerizasyon işlemi tamamlanmıştır. Enkapsülasyon sürecinin kararlı bir şekilde sonuçlandırılmasının ardından elde edilen hazır kapsül süspansiyonları; aplikasyon aşamasına kadar oda sıcaklığında, karanlık, kuru ve nemsiz bir ortamda muhafaza edilmiştir.



-a- -b-

Şekil.1 a; 140205 Repellent Capsule,koku notası b; 140206 Lavender Aromatic koku notası

Hazır mikroenkapsüle sistemler Şekil 2'de gösterilen beyaz renkli triko eldiven yüzeylerine sprey aplikasyon yöntemi ile uygulanmıştır. Sprey yöntemi sayesinde mikrokapsüllerin kumaş yüzeyine homojen dağılım göstermesi ve aktif bileşenlerin yüzeyde etkin şekilde tutulması hedeflenmiştir (Şekil.3).



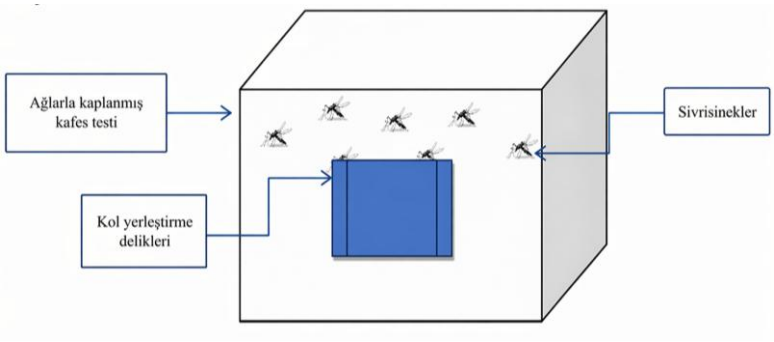
Şekil.2 Beyaz triko eldiven.



Şekil.3 Kullanılan sprey yöntemi ve mikrokapsül yapısı.

B. Sinek Kovucu Performans Testi

Geliştirilen numunelerin sinek kovucu performanslarının belirlenmesi amacıyla kafes testi yöntemi uygulanmıştır. Testler, RTÜ bünyesinde Dünya Sağlık Örgütü (WHO) protokolüne uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil.4). Testlerde sarı humma taşıyıcısı olarak bilinen *Aedes aegypti* sivrisinek türü kullanılmıştır.



Şekil.4 Sinek kafesi testi

Kafes testi yönteminde, işlem görmüş ve işlem görmemiş kumaş yüzeylerine sivrisineklerin konma davranışları gözlemlenmiş ve kumaşların kovucu etkileri karşılaştırılmıştır. Denemeler toplam 3 dakika esas alınarak yürütülmüş, her 30 saniyede bir sayım gerçekleştirilmiştir. Testler üç saat boyunca her yarım saatte bir tekrar edilmiştir. Ayrıca deneysel güvenilirliğin sağlanması amacıyla pozitif ve negatif kontrol numuneleri de test sürecine dahil edilmiştir.

Sinek kovucu etkinlik değerleri Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2009) tarafından önerilen aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\%\ Repellency = \frac{(C-T)}{C} \times 100$$

Burada;

C kontrol numunesine yönelen sivrisinek sayısını, T ise işlem görmüş numuneye yönelen sivrisinek sayısını ifade etmektedir.



-a- -b-

Şekil 5 a; Çalışma Lavender esansı sprey uygulaması, b; Repellent esansı sprey uygulaması

III. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında lavanta ve repellent esanslı mikroenkapsüle sistemlerin triko eldiven yüzeylerine uygulanmasıyla sinek kovucu fonksiyon kazandırılmıştır. Elde edilen mikroenkapsüle sistemlerin sprey yöntemiyle uygulandığı triko yüzeylerden elde edilen sinek kovucu performans verileri, projenin hedeflerine ulaştığını net bir şekilde ortaya koymuştur.

Çalışma sonuçlarına göre, ticari mikroenkapsüle sistemler kullanılarak elde edilen numunelerde WHO protokolüne göre %97,9 ile %100 arasında değişen çok yüksek repellency değerleri elde edilmiştir. Özellikle lavanta esanslı içerikli sistemlerin daha yüksek koruyucu etki gösterdiği belirlenmiştir. Kontrol grubunda ise %0 repellency değeri elde edilmiştir.

Tablo.1 Çalışma sonuçları

	Konsantrasyon	**Aktivite Sayısı**	**% Repellency**
Lavander	20	1	99.71
Lavander	20	3	99.14
Lavander	30	0	100
Repellent	20	1	99.71
Repellent	20	7	97.99
Repellent	30	1	99.71
Kontrol Referans	-	348	0

Genel olarak sonuçlar, mikroenkapsülasyon teknolojisinin tekstil yüzeylerine başarılı şekilde uygulanabildiğini ve yüksek düzeyde sinek kovucu özellik kazandırdığını ortaya koymuştur.

IV. TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, mikroenkapsülasyon teknolojisinin fonksiyonel tekstil uygulamalarında etkin bir yöntem olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle uçucu yağların tekstil yüzeyine doğrudan uygulanması yerine kapsül yapısı içerisinde kontrollü salınım mekanizması ile kullanılması, performansın önemli ölçüde artmasını sağlamıştır.

Çalışmada elde edilen %97,9 ila %100 arasındaki üstün sinek kovma başarısı, tamamen projedeki mikrokapsüllerin üretim teknolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Tercih edilen hazır ticari sistemler, endüstriyel ölçekte emülsiyon polimerizasyonu gibi gelişmiş ve hassas tekniklerle sentezlendiği için oldukça kararlı, duvar kalınlığı homojen ve dayanıklı bir kapsül mimarisine sahiptir. Ayrıca kabuk yapısında yer alan formaldehit bazlı polimerik matris, dış ortam şartlarına (ısı, nem, hava akımı vb.) karşı kusursuz bir mukavemet göstererek esansın zamansız uçup gitmesini önlemiş, sadece kullanım anındaki sürtünme gibi mekanik etkilerle kontrollü ve uzun süreli bir aktif madde salınımı sağlamıştır.

Aplikasyon yöntemi açısından sprey tekniği değerlendirildiğinde; mikrokapsüllerin triko kumaşın gözenekli ve üç boyutlu elyaf yapısına homojen bir biçimde dağıldığı görülmüştür. Gerek doğal Lavender (Lavanta) gerekse sentetik Repellent aktif bileşenlerinin her ikisinde de birbirine çok yakın ve kusursuz sonuçlar (%97,9 - %100) alınması, fonksiyonel performansın aktif bileşen türünden ziyade esas olarak kullanılan kapsülleme kalitesine ve taşıyıcı sistem kararlılığına bağlı olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum, akıllı ve koruyucu fonksiyonel tekstil tasarımında "taşıyıcı polimerik yapının" seçimi ve optimizasyonunun en kritik başarı kriteri olduğunu literatüre göstermektedir.Sonuç olarak, mikroenkapsülasyon teknolojisi ile geliştirilen triko tekstillerin sivrisinek kovucu özellik kazandırmada etkili olduğu ve özellikle hazır ticari sistemlerin yüksek performans sunduğu görülmüştür. Bu yaklaşım, hem günlük kullanım tekstillerinde hem de koruyucu fonksiyonel tekstil ürünlerinde önemli bir potansiyele sahiptir.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma kapsamında, endüstriyel kalitedeki emülsiyon polimerizasyonu tabanlı hazır mikroenkapsüle Lavanta ve Repellent esans sistemlerinin triko yüzeylere sprey aplikasyonu ile uygulanmasıyla, fonksiyonel konfeksiyon ürünlerinde ulaşılabilecek en üst düzeyde sinek kovucu etkinlik (%97,9 - %100) başarıyla elde edilmiştir. Proje sonuçları, mikroenkapsülasyon teknolojisinin tekstil lifleri üzerinde kontrollü salınım mekanizmasını kusursuz şekilde tetiklediğini ve aktif bileşenlerin uçuculuk dezavantajını tamamen ortadan kaldırdığını ispatlamıştır. Ticari mikroenkapsüle sistemlerin bu denli yüksek ve stabil performans göstermesi, tekstil sektöründe endüstriyel olarak standartlaştırılmış kapsül teknolojilerinin kullanılmasının önemini açıkça vurgulamaktadır. Hazır sistemlerin sunduğu kontrollü salım mekanizması ve çevre şartlarına dayanıklı sert polimerik kabuk yapısı, tekstil performansını doğrudan artıran temel unsur olmuştur. Genel olarak elde edilen bu başarılı sonuçlar, fonksiyonel tekstil alanında böcek kovucu yazlık triko ürünlerin seri üretimi için güçlü bir zemin hazırlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşımın, gelecekte hem günlük şık/rahat giyim triko tasarımlarında hem de askeri tekstiller, dış ortam (outdoor) kıyafetleri ve fonksiyonel koruyucu teknik tekstil uygulamalarında geniş bir pazar payı bularak yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen bu fonksiyonel triko yapıların endüstriyel yıkama çevrimleri karşısındaki performans kararlılığı ve uzun süreli kullanım dayanımları analiz edilecektir.

KAYNAKLAR

[1] B. Akgünoğlu, S. Özkayalar, S. Kaplan and S. A. Aksoy, "Comfort performances of microcapsule- Applied functional socks including phase change material," *Tekstil ve Mühendis*, 25, 111, 2018.

[2] G. Ertekin, N. Oğlakçıoğlu and A. Marmaralı, "Pamuk/Elastan örme kumaşların mukavemet ve ısıl konfor özellikleri," *Tekstil ve Mühendis*, 25, 227–236, 2018.

[3] W. J. Choi and H. S. Ki, "A Study on mechanical properties of composite jacquard according to gauge change - Focusing on acrylic/wool flat knit jacquard," *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 42, 1018–1030, 2018.

[4] A. Yavaşcaoğlu, R. Eren and G. Süle, "Gömleklik dokuma kumaşlarda akrilik iplik kullanının etkileri," *Tekstil ve Mühendis*, 25, 312–322, 2018.

[5] A. M. Grancarić, K. Laird, L. Botteri, J. Shen and K. Laatikainen, "Microencapsulation for improved mosquitoes' repellent efficacy of cotton fabrics," *Journal of Microencapsulation*, 37, 59–67, 2020.

[6] N. A. A. Johan, H. H. Hasmadi, K. S. Peter, S. H. Nasir, H. Mustafa El Bakri and N. Misni, "Development of multifunctional textiles with mosquito repellent and antibacterial properties using microencapsulated lemongrass essential oil on cotton–polyester fabric," *Fibers and Polymers*, 26(12), 5455-5464, 2025.

[7] S. S. Parul and L. Mohan, "Methods and applications imparting plant essential oils as mosquito repellency agents on textiles," 2022.

[8] G. K. Dhillon, S. Bains, S. Grewal and K. D. Kocher, "Mosquito repellent eucalyptus and rosemary essential oil finishes for cotton fabric," *International Journal of Chemical Studies*, *9*(1), 31-34, 2021.

[9] M. Murtaza, A. I. Hussain, G. M. Kamal, S. Nazir, S. A. S. Chatha, M. Asmari, ... and S. Murtaza, "Potential applications of microencapsulated essential oil components in mosquito repellent textile finishes," *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26, 914–933, 2023.
[10] F. R. Abdul Aziz, J. Jai, R. Raslan and I. Subuki, "Microencapsulation of Essential Oils Application in Textile: A Review," *Journal of Mechanical Engineering*, 12, 47–61, 2015.
[11] S. Ghayempour and M. Montazer, "Micro/nanoencapsulation of essential oils and fragrances: Focus on perfumed, antimicrobial, mosquito-repellent and medical textiles," *Journal of Microencapsulation*, 33, 497–510, 2016.
[12] C. Liu, B. Liang, G. Shi, Z. Li, X. Zheng, Y. Huang and L. Lin, "Preparation and characteristics of nanocapsules containing essential oil for textile application," *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 42420, 2015.
[13] K. Laird, J. Shen, A. Marija Grancaric and L. Botteri, "Development of sustainable cotton fabrics with natural immortelle essential oil for antimicrobial and mosquito repellent functions," *Autex Research Journal*, 19, 301–307, 2019.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Silis Kumu Zenginleştirme Keki Esaslı Pişmiş Tuğla Özelliklerinin Araştırılması

Gökhan Görhan[a], Gökhan Kürklü[a], Ahmet Yıldız[b]*

[a]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye.
[b]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye.
[*]**Sorumlu Yazar:** ggorhan@aku.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul – Şile bölgesinde faaliyet gösteren özel bir işletmeden temin edilen silis kumu zenginleştirme keki (SKZK) ana hammadde olarak kullanılmıştır. İlgili hammadde üretim öncesinde öncelikle laboratuvar tipi etüvde kurutulmuş ardından da yine laboratuvar tipi değirmende yeterli inceliğe gelinceye kadar öğütülmüştür. Daha sonra SKZK, plastikliğinin sağlanması amacıyla ağırlıkça % 30 oranında su ile karıştırılarak bir gün dinlenmeye bırakılmış ve akabinde laboratuvar tipi ekstrüzyonda 40x70 mm ölçülerinde şekillendirilmiştir. Şekillendirilen örnekler, ekstrüzyonda bulunan kalıp yardımıyla düşey delikli tuğla olarak üretilmiştir. Üretilen SKZK esaslı tuğlalar doğal ortamda kurutulduktan sonra elektrikli fırında üç farklı sıcaklıkta pişirilmiştir. Tuğla örnekleri; 600 ^{o}C', 750 ^{o}C' ve 900 ^{o}C'lik sıcaklıklarda ve 2.5 ^{o}C/dk. pişirme hızında pişirilmiştir. Pişmiş tuğla örneklerine ait fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla ilgili örneklerin; ağırlıkça su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık, ilk su emme hızı ve kapiler su emme katsayıları belirlenmiştir. Mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanım değerleri de örnekler üzerinden belirlenmiş ve uygulanan pişirme sıcaklıklarının örnek özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *SKZK, Tuğla, Fiziksel özellikler, Mekanik özellikler*.

Investigation of the Properties of Fired Bricks Based on Silica Sand Beneficiation Cake

ABSTRACT

In this study, silica sand beneficiation cake (SSBC) obtained from a private company operating in the Şile region of Istanbul was used as the main raw material. Prior to production, the raw material was first dried in a laboratory-type oven and then ground in a laboratory-type mill until it reached sufficient fineness. Subsequently, to ensure plasticity, the SSBC was mixed with 30% water by weight, left to rest for one day, and then shaped into 40x70 mm sizes using a laboratory-type extrusion. The shaped samples were produced as vertically perforated bricks using a mold in the extrusion machine. After drying in a natural environment, the produced SSBC-based bricks were fired in an electric kiln at three different temperatures: 600 °C, 750 °C, and 900 °C, with a firing speed of 2.5 °C/min. To determine the physical properties of the fired brick samples, the following analyses were performed: water absorption by weight, apparent porosity, unit volume weight, initial water absorption rate, and capillary water absorption coefficients were determined. Compressive strength values, one of the mechanical properties, were also determined from the samples, and the changes in sample properties caused by the applied firing temperatures were investigated.

Keywords: *SSBC, Brick, Physical properties, Mechanical properties*.

I. GIRIŞ

Günümüzde inşaat sektöründe kil tuğlaları önemli bir kullanımla vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Ülkemizin ekonomisi ve tuğlaların maliyeti açısından değerlendirildiğinde kil tuğlaların daha çok tercih edildiği belirtilmektedir. Kil tuğlalarının uygun maliyetle üretilebilmelerinin yanında termal yalıtım, hafiflik ve kolay üretilebilir olması gibi bazı önemli özelliklere sahip olduğu da ifade edilmektedir [1]. Bununla

birlikte tuğlalar, kil esaslı olarak tuğla fabrikalarında ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilmekte ardından da fırınlarda pişirilmektedir. İnsanlık tarihinde çok uzun bir geçmişe uzanan tuğla, günümüze kadar varlığını sürdüren ve inşaat endüstrisindeki en önemli unsurlardan biri olarak kabul edilirken binaların dış ve iç duvarlarında kullanılan bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır [2].

Mimarlık tarihinde de tuğlalar en eski inşaat malzemelerinden biri olup XIX. Yüzyılın ortalarına kadar tuğla harmanlarında üretimler gerçekleştirilmiştir. İlgili üretimlerde geleneksel yöntemlerle toprak, su ile balçık haline getirilmekte ardından da istenilen kıvamda kalıplara dökülerek açık havada bir süre bekletildikten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmektedir. Gelişen tuğla teknolojisiyle birlikte tuğlaların standart ölçülerde ve istenilen kalitede üretilebilmesiyle kullanımının arttığı da belirtilmiştir [3].

Tuğla üretiminin bir aşaması olan pişirme işlemlerinde önemli miktarda gaz bileşiği üretilmektedir. Çevre mevzuatı gereğince atmosfere salınabilecek gazlar üzerinde sınırlama bulunduğundan tuğla imalatında kullanılan hammaddelerin bu tür gaz üreten fazlarının ve niceliğinin de belirlenmesi gerektiği ifade edilmektedir [4].

Yapılan bu çalışmada ise, tuğla üretiminde silis kumu zenginleştirme keki (SKZK) hammadde olarak kullanılmıştır. Örneklerin üretiminde başka bir hammadde ve/veya katkı kullanılmadan sayede su ile SKZK malzemesi karıştırılmış ve laboratuvar koşullarında tuğla örnekleri üretilmiştir. İlgili örnekler üzerinde farklı sıcaklıklarda pişirme işlemleri yapılarak örneklerin özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmış ve elde edilen bulgulara göre SKZK esaslı tuğlalar için en ideal pişirme sıcaklığının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL METOT

Örnek üretimlerinde, İstanbul – Şile bölgesinde faaliyet gösteren özel bir işletmeden temin edilen, %57.23 SiO_2, %24.46 Al_2O_3 ve %6.49 Fe_2O_3 içerikli [5] silis kumu zenginleştirme keki (SKZK) (Resim 1) ana hammadde olarak kullanılmıştır. Çalışmada, SKZK esaslı tuğla örnekleri laboratuvar tipi vakumlu ekstrüzyonda delikli tuğla olarak şekillendirilmiştir.

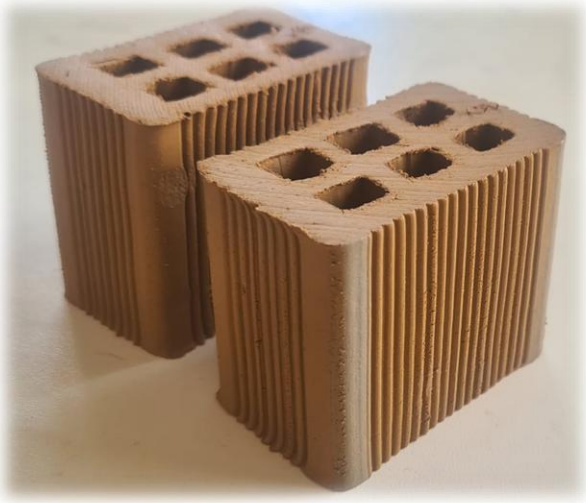
İlgili hammadde üretim öncesinde öncelikle laboratuvar tipi etüvde kurutulmuş ardından da yine laboratuvar tipi değirmende yeterli inceliğe gelinceye kadar öğütülmüştür. Daha sonra SKZK, plastikliğinin sağlanması amacıyla ağırlıkça % 30 oranında su ile karıştırılarak bir gün dinlenmeye bırakılmış ve akabinde laboratuvar tipi ekstrüzyonda 40 mm x 70 mm ölçülerinde şekillendirilmiştir (Resim 2).

Şekillendirilen örnekler, ekstrüzyonda bulunan kalıp yardımıyla düşey delikli tuğla olarak üretilmiştir. Üretilen SKZK esaslı tuğlalar doğal ortamda kurutulduktan sonra elektrikli fırında üç farklı sıcaklıkta pişirilmiştir. Tuğla örnekleri; 600 ^oC', 750 ^oC' ve 900 ^oC'lik sıcaklıklarda ve 2.5 ^oC/dk. pişirme hızında pişirilmiştir (Resim 3).

Pişmiş tuğla örneklerine ait fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla ilgili örneklerin; ağırlıkça su emme oranları TS EN 771-1 [6]'e göre; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri ise TS EN 772-4 [7]'e göre belirlenmiştir. Ayrıca ilk su emme hızı ve kapiler su emme katsayıları ise TS EN 772-11 [8]'e göre belirlenmiştir. Mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanım değerleri de TS EN 772-1 [9] nolu standarda göre belirlenmiş ve uygulanan pişirme sıcaklıklarının örnek özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Tüm testlerde 3 farklı örnek grubunda 6'şar adet tuğla örneği kullanılmıştır.



Resim 1. Doğal haldeki silis kumu zenginleştirme keki (SKZK)



Resim 2. Üretilen SKZK esaslı tuğlalar



Resim 3. Fırına yerleştirilen tuğlalar

SONUÇLAR

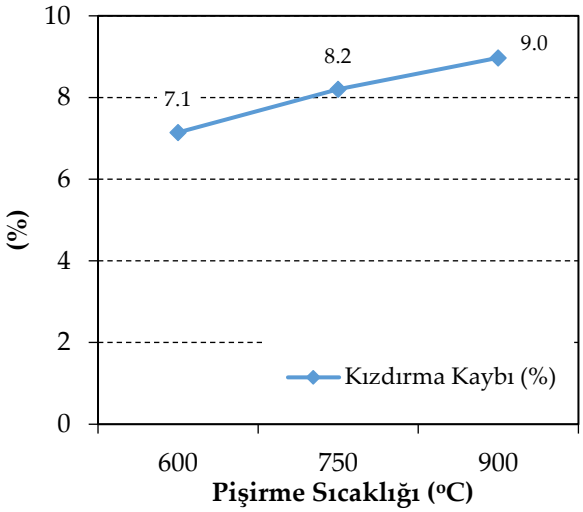
SKZK esaslı örneklerin kızdırma kaybı oranları dikkate alındığında (Şekil 1); artan pişirme sıcaklıklarına paralel olarak örneklerin değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. En yüksek kızdırma kaybı değeri 900 ^{o}C'de pişirilen örneklerde %9 olarak ortaya çıkmıştır.

Tuğlaların ağırlıkça su emme oranları % 16.6 - % 16.9 arasında değişkenlik gösterirken, görünen porozite oranlarının % 29.4 - % 30.2 arasında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 2). Dolayısıyla her iki bulgu da artan pişirme sıcaklığı ile ufak bir oranda yükselme göstermiştir. Bu verilerle paralel olarak değerlendirilebilecek olan birim hacim ağırlık (BHA) ve görünür yoğunluk değerleri ise (Şekil 3) sırasıyla 1770 kg/m^3 – 1782 kg/m^3 ve 2507 kg/m^3 – 2552 kg/m^3 arasında değişkenlik göstermiştir. Her iki bulgunun da artan pişirme sıcaklığı ile kısmen yükseldiği tespit edilmiştir.

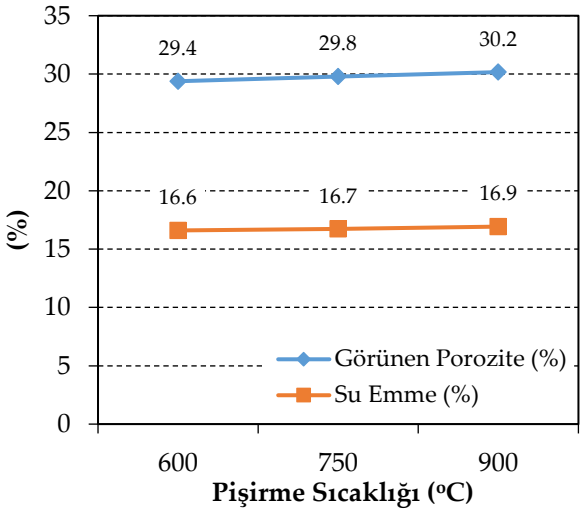
SKZK esaslı tuğlalarda en düşük ilk su emme hızı (0.394 kg/m^{2}xdak.) ve kapiler su emme katsayısı 750 ^{o}C'de pişirilen örneklerde, en yüksek değerler ise 900 ^{o}C'de pişirilen örneklerde ortaya çıkmıştır (Şekil 4 ve Şekil 5).

SKZK esaslı tuğlaların önemli bir mekanik özelliği olan basınç dayanım değerleri dikkate alındığında (Şekil 6) ise; en yüksek basınç dayanımının 900 ^{o}C'de pişirilen örneklerde 5.4 MPa olarak elde edildiği, en düşük

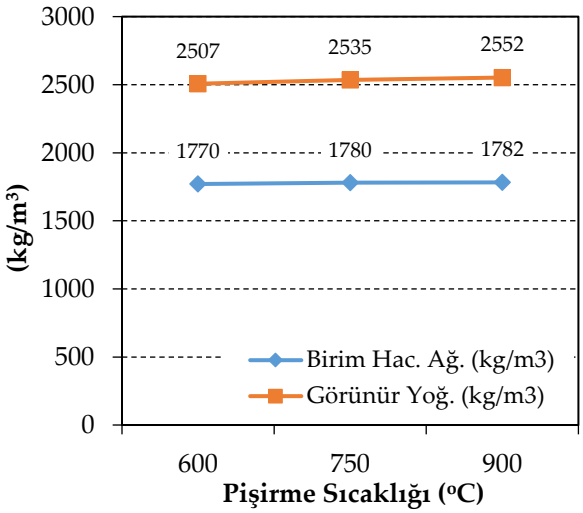
basınç dayanımının ise 600 ºC'de pişirilen örneklerde 3.7 MPa olarak elde edildiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, SKZK esaslı tuğlaların basınç dayanımları artan pişirme sıcaklığı ile artmıştır.



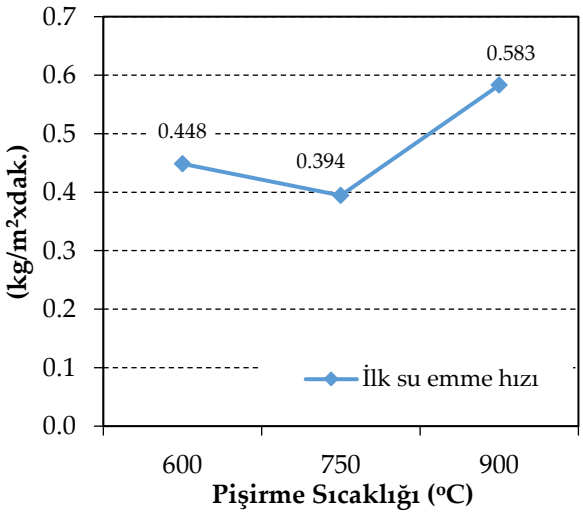
Şekil 1. Kızdırma kaybı oranları (%)



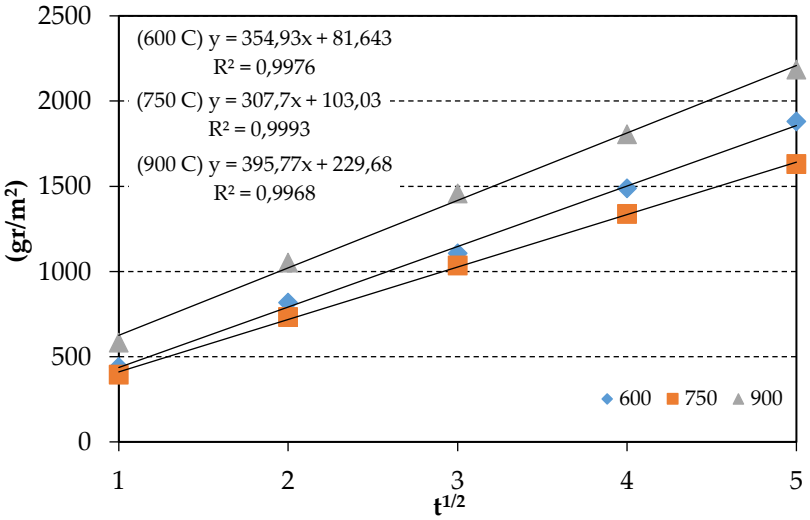
Şekil 2. Görünen porozite ve su emme oranları (%)



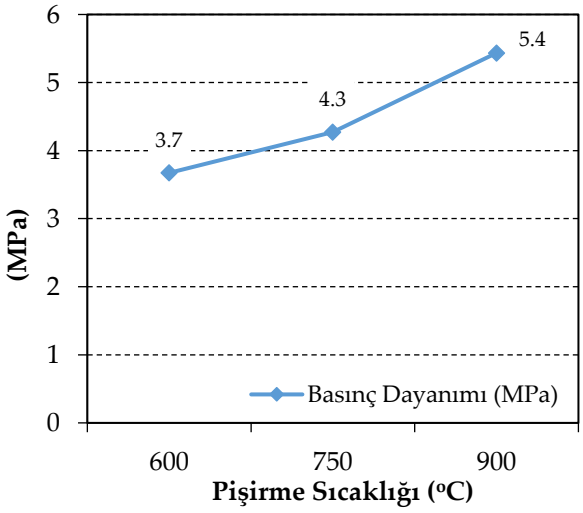
Şekil 3. Birim hacim ağırlık ve Görünür yoğunluk değerleri (kg/m³)



Şekil 4. İlk su emme hızı grafiği



Şekil 5. Kapiler su emme grafiği



Şekil 6. Basınç dayanımı değerleri (MPa)

III. TARTIŞMA

SKZK esaslı tuğla örnekleri üzerinde yapılan testler sonucunda pişirme sıcaklığındaki artışların, fiziksel özellikler bakımından çok küçük oranlardaki artışları beraberinde getirdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla SKZK esaslı tuğlalarda; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerlerinin pişirme sıcaklıkları ile önemli bir değişim göstermediği ortaya konulmuştur.

Tek bileşen olarak ve katkısız halde kullanılan SKZK esaslı tuğlalarda uygulanan pişirme sıcaklığının açık gözenekliliği önemli seviyede etkilemediği düşünülmektedir. Gözenek yapısında önemli bir değişim olmamasının yanında tuğlaların ilk su emme hızı ve kapiler su emme katsayıları dikkate alındığında en ideal örnek grubunun 750 ^{o}C'de pişirilen örnekler olduğu kanaatine varılmıştır.

Basınç dayanımı açısından ise örneklerde 3.7 MPa – 5.4 MPa arasında değişin basınç dayanım değerleri elde edilmiş olup, ilgili örneklerin yapılarda bölme duvarlarda kullanılabilecek seviyede dayanıma sahip oldukları düşünülmekle birlikte en yüksek değerin 5.4 MPa ile 900 ^{o}C'de pişirilen örneklerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

IV. ÇIKARIM

Silis kumu zenginleştirme kekinin hammadde olarak kullanıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki çıkarımlara ulaşılmıştır;

- Bölme duvar elemanı olarak değerlendirilebilecek olan SKZK esaslı tuğlaların sıcaklığa bağlı olarak fiziksel özelliklerindeki değişim oldukça sınırlıdır.
- Basınç dayanımı açısından ise tüm pişirme sıcaklıkları sonucunda bölme duvarlarda kullanılabilmeleri açısından SKZK esaslı tuğlaların yeterli basınç dayanımına sahip olduğundan 600 ^{o}C'de yapılacak üretimin çevresel etki bakımında en ideal üretim yöntemi olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M241 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] G. Bakıroğlu. "İçme suyu arıtma çamuru ve yumurta kabuğundan ısı yalıtım tuğlası üretimi ve karakterizasyonu," Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2024.

[2] S. N. A. Al Amara, A. Çağlar. "Geopolimer Tuğla Üretiminde Atık Kullanımı Üzerine Yapılan Akademik Çalışmalar," *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 5(2), 171–176, 2022.

[3] Ş. Kaya. "XIX. Yüzyılda İstanbul'da tuğla üretimi ve çobançeşme tuğla fabrikası," *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 50, 165–188, 2017.

[4] A. J. Parsons, S.D.J. Inglethorpe, D.J. Morgan, A.C. Dunham. "Evolved Gas Analysis (EGA) of brick clays," *Journal of Thermal Analysis*, 48(1), 49–62, 1997.

[5] G. Görhan, A. Yıldız, G. Kürklü, M. Karayigen. "Silis Kumu Zenginleştirme Keki Esaslı Geopolimer Tuğla Üretiminin Optimizasyonu," Proje Sonuç Raporu, *Proje No: 124M241*, Tübitak Projesi, 2025.

[6] TS EN 771-1. "Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units," Ankara-Turkey, 2015.

[7] TS EN 772-4. "Methods of test for masonry units - Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units," Ankara-Turkey, 2000.

[8] TS EN 772-11. "Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units," Ankara-Turkey, 2011.

[9] TS EN 772-1. "Methods of test for masonry units- Part 1: Determination of compressive strength," Ankara-Turkey, 2002.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Düz Bir Endüstriyel Yüzeyde Farklı Yalıtım Malzemeleri ve Kalınlıklarının Isıl ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

*Neslin Hasar Ocak**

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye.
***Sorumlu Yazar:** neslin.hasar@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, düz bir endüstriyel proses hattı yüzeyinde farklı yalıtım malzemeleri ve yalıtım kalınlıklarının ısıl ve ekonomik sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Cam yünü, taş yünü ve seramik elyaf yalıtım malzemeleri kullanılmış olup, her bir malzeme için 0.01, 0.03 ve 0.05 m kalınlık değerleri dikkate alınmıştır. Yalıtımsız referans durum ile yalıtımlı durumlar aynı sınır koşulları altında karşılaştırılmıştır. Her bir durum için toplam ısı kaybı hızı, yıllık enerji kaybı ve yıllık enerji maliyeti hesaplanmıştır. Ayrıca, referans duruma göre yıllık tasarruf ve ısı kaybı azaltım oranları belirlenmiştir. Sonuçlar, yalıtım uygulamasının tüm durumlarda ısı kaybını ve yıllık maliyeti önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. En iyi sonuç, 0.05 m kalınlıktaki taş yünü uygulamasında elde edilmiş; bu durumda ısı kaybı hızı 99.90 W, yıllık tasarruf ise 23653.22 TL düzeyine ulaşmıştır. Cam yünü taş yününe yakın sonuçlar verirken, seramik elyaf daha yüksek ısı kaybı ve daha düşük ekonomik kazanç sağlamıştır. Elde edilen bulgular, yalıtım performansının yalnızca malzeme türüne değil, aynı zamanda yalıtım kalınlığına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Enerji tasarrufu, Yalıtım kalınlığı, Yalıtım malzemeleri.*

Thermal and Economic Evaluation of Different Insulation Materials and Thicknesses on a Flat Industrial Surface

ABSTRACT

In this study, the thermal and economic outcomes of different insulation materials and insulation thicknesses applied to a flat industrial process line surface were evaluated comparatively. Glass wool, rock wool, and ceramic fiber insulation materials were considered, and thickness values of 0.01, 0.03, and 0.05 m were taken into account for each material. Uninsulated reference and insulated cases were compared under the same boundary conditions. For each case, the total heat loss rate, annual energy loss, and annual energy cost were calculated. In addition, the annual savings and heat loss reduction ratios were determined with respect to the reference case. The results showed that insulation application significantly reduced heat loss and annual cost in all cases. The best result was obtained with the 0.05 m rock wool insulation, for which the heat loss rate was 99.90 W and the annual savings reached 23653.22 TL. While glass wool yielded results close to those of rock wool, ceramic fiber resulted in higher heat loss and lower economic benefit. The findings reveal that insulation effectiveness depends not only on the material type but also on the insulation thickness.

Keywords: *Energy saving, Insulation materials, Insulation thickness.*

I. GIRIŞ

Endüstriyel sektör, küresel nihai enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [1]. Proses hatları, sıcak yüzeyler ve yüksek sıcaklıkta akışkan taşıyan sistemler, bu tüketimin başlıca kaynakları arasında yer almaktadır [2]. Özellikle endüstriyel yüzeylerden çevreye gerçekleşen kontrolsüz ısı kayıpları, toplam enerji verimliliğini azaltmakta ve işletme maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle, yüzeylerden kaynaklanan ısı kayıplarının azaltılması, enerji verimliliği çalışmalarında önemli bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir [3, 4].

Literatürde, yalıtım malzemesi seçimi ve yalıtım kalınlığının enerji kaybı, ekonomik performans ve sistem verimliliği üzerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir. Farklı yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayılarına bağlı olarak boru ve düz yüzey uygulamalarında ısı kaybı düzeylerinin değiştiği, uygun yalıtım uygulamaları ile enerji tüketiminde önemli azalmalar sağlanabildiği bildirilmektedir. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığına yönelik çalışmalar, enerji tasarrufu ile yatırım maliyeti arasındaki ilişkinin tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [5, 6].

Isı geçişinin analitik olarak incelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri ısıl direnç ağı yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, iletim ve taşınım mekanizmaları seri bağlı dirençler şeklinde modellenmekte ve böylece çok katmanlı sistemlerde toplam ısı geçişi güvenilir bir hesap çerçevesi içinde belirlenebilmektedir. Özellikle düz yüzeyler ve boru sistemleri gibi mühendislik uygulamalarında, toplam ısı kaybının hesaplanmasında ısıl direnç yöntemi pratik ve işlevsel bir temel sunmaktadır [7].

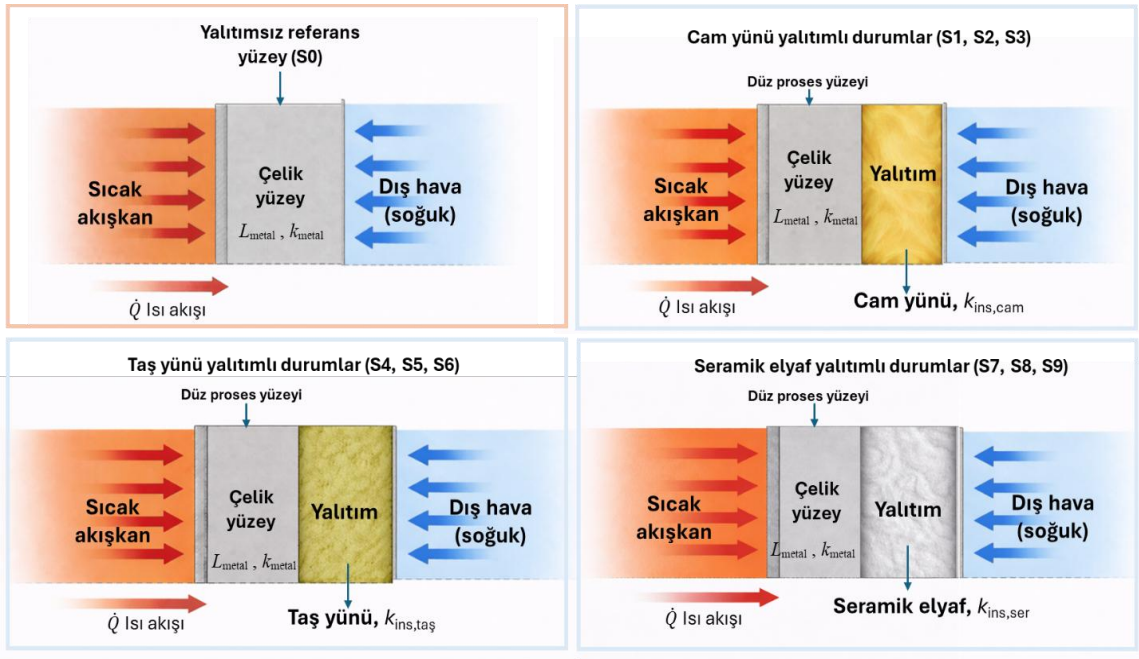
Bununla birlikte, mevcut çalışmaların önemli bir kısmı optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine odaklanmakta; sabit sınır koşulları altında farklı yalıtım malzemelerinin karşılaştırmalı ısıl ve ekonomik performanslarının birlikte değerlendirildiği çalışmaların daha sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle yıllık enerji kaybı ve yıllık maliyet açısından karşılaştırılabilir ve hesap temelli değerlendirmeler, uygulamaya dönük karar süreçleri bakımından önem taşımaktadır [8, 9].

Bu çalışmada, düz bir endüstriyel proses hattı yüzeyi için ısıl direnç modeli esas alınarak cam yünü, taş yünü ve seramik elyaf malzemelerinin farklı kalınlıklardaki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yalıtımsız referans durum ile yalıtımlı durumlar için toplam ısı kaybı, yıllık enerji kaybı ve yıllık maliyet değerleri hesaplanmış; elde edilen sonuçlar yalıtım malzemesi ve kalınlık seçiminin enerji performansı üzerindeki etkisini ortaya koyacak şekilde değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, sabit çalışma koşulları altında farklı yalıtım seçeneklerinin ısıl ve ekonomik açıdan birlikte karşılaştırılmasına dayalı sade bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

II. Materyal ve Metot

Bu çalışmada düz bir endüstriyel proses hattı yüzeyinde meydana gelen ısı kaybı, ısıl direnç ağı yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz, farklı yalıtım malzemeleri ve üç farklı kalınlık uygulaması için karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla tüm sınır koşulları sabit tutulmuş, yalnızca yalıtım malzemesinin ısıl iletkenliği ve kalınlığı değiştirilmiştir.

Şekil 1'de, çalışmada esas alınan yalıtımsız referans durum ile farklı yalıtım malzemeleri için oluşturulan yalıtımlı durumlar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Yalıtımsız ve yalıtımlı durumların şematik gösterimi.

A. Geometrik Model ve Varsayımlar

Model, sıcak akışkan ile temas eden düz bir çelik yüzey ve bu yüzey üzerine uygulanan yalıtım katmanından oluşmaktadır. Isı geçişi yüzeye dik doğrultuda ve tek boyutlu kabul edilmiştir. Sistem kararlı rejimde değerlendirilmiştir [10].

Isı transferi mekanizmaları iletim ve taşınım ile sınırlandırılmıştır. Radyasyon etkisi, çalışmanın karşılaştırmalı ve ön değerlendirme niteliğinde olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Analizde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir:

Tablo 1. Analizde kullanılan parametreler ve malzeme özellikleri.

Grup	Parametre	Sembol	Değer	Birim	Durum
Sınır Koşulları	Yüzey alanı	A	1	m^2	Sabit
	Sıcaklık farkı	ΔT	150	K	Sabit
	İç taşınım katsayısı	h_i	20	W/m^2K	Sabit
	Dış taşınım katsayısı	h_o	10	W/m^2K	Sabit
Metal Katman	Çelik kalınlığı	L_{metal}	0.005	m	Sabit
	Çeliğin ısıl iletkenliği	k_{metal}	45	W/mK	Sabit
Yalıtım Katmanı	Yalıtım kalınlığı	L_{ins}	0.01 / 0.03 / 0.05	m	Değişken
	Cam yünü iletkenliği	$k_{\text{ins,cam}}$	0.042	W/mK	Değişken
	Taş yünü iletkenliği	$k_{\text{ins,taş}}$	0.037	W/mK	Değişken
	Seramik elyaf iletkenliği	$k_{\text{ins,ser}}$	0.092	W/mK	Değişken
Zaman	Yıllık çalışma süresi	t	5000	saat/yıl	Sabit

Karşılaştırılabilirlik amacıyla A, ΔT, h_i ve h_o tüm durumlarda sabit tutulmuştur. Yalnızca yalıtım kalınlığı L_{ins} ve yalıtım malzemesine bağlı ısıl iletkenlik katsayısı k_{ins} değiştirilmiştir.

B. Isıl Direnç Modeli

Bu çalışmada toplam ısı kaybı, seri bağlı ısıl dirençler kullanılarak hesaplanmıştır. Isı akışı, iç taşınım, metal katmanında iletim, yalıtım katmanında iletim ve dış taşınım mekanizmalarının birleşik etkisiyle belirlenmiştir. Toplam ısıl direnç Eşitlik (1) ve buna bağlı toplam ısı kaybı hızı Eşitlik (2) ile ifade edilmiştir [11, 12]:

$$R_{top} = \frac{1}{h_i A} + \frac{L_{metal}}{k_{metal} A} + \frac{L_{ins}}{k_{ins} A} + \frac{1}{h_o A} \tag{1}$$

Toplam ısı kaybı hızı :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{top}} \quad \text{(W)} \tag{2}$$

Burada;

A: Yüzey alanı (m^2),
ΔT: Sıcaklık farkı (K),
h_i: İç taşınım katsayısı (W/m^2K),
h_o: Dış taşınım katsayısı (W/m^2K),
L_{metal}: Metal (çelik) katman kalınlığı (m),
k_{metal}: Metal (çelik) ısıl iletkenliği (W/mK),
L_{ins}: Yalıtım katmanı kalınlığı (m),
k_{ins}: Yalıtım katmanı ısıl iletkenliği (W/mK).

C. İncelenen Durumlar

Çalışmada bir referans ve dokuz yalıtımlı durum olmak üzere toplam on farklı durum değerlendirilmiştir. İlk olarak yalıtımsız çelik yüzey referans durum olarak ele alınmıştır. Bu durumda ısı geçişi yalnızca iç taşınım, metal iletimi ve dış taşınım dirençlerinden oluşmaktadır.

Yalıtımlı durumlarda ise metal yüzey üzerine farklı yalıtım malzemeleri uygulanmıştır. İncelenen durumlar ve ilgili k_{ins} ile L_{ins} değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İncelenen durumlar ve yalıtım kalınlıkları.

Durum	Yalıtım durumu	Yalıtım malzemesi	k_{ins} (W/mK)	L_{ins} (m)
S0	Referans	Yalıtımsız	–	0
S1	Yalıtımlı	Cam yünü	0.042	0.01
S2				0.03
S3				0.05
S4	Yalıtımlı	Taş yünü	0.037	0.01
S5				0.03
S6				0.05
S7	Yalıtımlı	Seramik elyaf	0.092	0.01
S8				0.03
S9				0.05

Not: S0 yalıtımsız referans durumudur; yalıtımlı durumlarda yalnızca k_{ins} ve L_{ins} değiştirilmiştir.

Tüm durumlar aynı sınır koşulları altında değerlendirilmiştir. Yalıtım malzemelerine ait ısıl iletkenlik katsayıları, literatürde ve ürün teknik veri sayfalarında raporlanan nominal değerler esas alınarak belirlenmiştir [13, 14, 15].

D. Yıllık Enerji Kaybının Hesaplanması

Her bir durum için Eşitlik (2) kullanılarak ısı kaybı hızı ($\dot{Q}$) hesaplanmıştır. Elde edilen ısı kaybı yıllık çalışma süresi ile çarpılarak yıllık enerji kaybı belirlenmiştir. Çalışma süresi 5000 saat/yıl olarak kabul edilmiştir. Yıllık enerji kaybı Eşitlik (3) ile hesaplanmıştır:

$$E_{yıl} = \frac{\dot{Q} \cdot t}{1000} \quad \text{(kWh)} \tag{3}$$

Burada;

$E_{yıl}$: Yıllık enerji kaybı (kWh),
$\dot{Q}$: Isı kaybı hızı (W),
t: Yıllık çalışma süresi (saat/yıl).

1000 katsayısı, W·h biriminin kWh birimine dönüştürülmesi amacıyla kullanılmıştır.

E. Ekonomik Değerlendirme

Yalıtım uygulamalarının ekonomik etkisini belirlemek amacıyla, yıllık enerji kaybı $E_{yıl}$ birim elektrik fiyatı ile çarpılarak yıllık enerji maliyeti hesaplanmıştır. Birim elektrik fiyatı, EPDK tarafından yayımlanan ilgili dönem tarife tabloları esas alınarak 5.26 TL/kWh olarak alınmıştır [16].

Yıllık maliyet Eşitlik (4) ile ifade edilmiştir:

$$C_{yıl} = E_{yıl} \times C_{birim} \quad \text{(TL/yıl)} \tag{4}$$

Yalıtım uygulaması ile sağlanan yıllık ekonomik kazanç (tasarruf), referans durum (S0) ile ilgili yalıtımlı durum arasındaki maliyet farkı olarak Eşitlik (5) ile tanımlanmıştır:

$$Tasarruf_{yıl} = C_{yıl,S0} - C_{yıl,Si} \quad \text{(TL/yıl)} \tag{5}$$

Burada;

$C_{yıl}$: Yıllık enerji maliyeti (TL/yıl),
$E_{yıl}$: Yıllık enerji kaybı (kWh/yıl),
C_{birim}: Birim elektrik fiyatı (TL/kWh),

S_0: Yalıtımsız referans durum,
S_i: İncelenen yalıtımlı durum (S1–S9).

Bu yaklaşım, yalıtım malzemesi ve kalınlık seçiminin enerji maliyeti üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

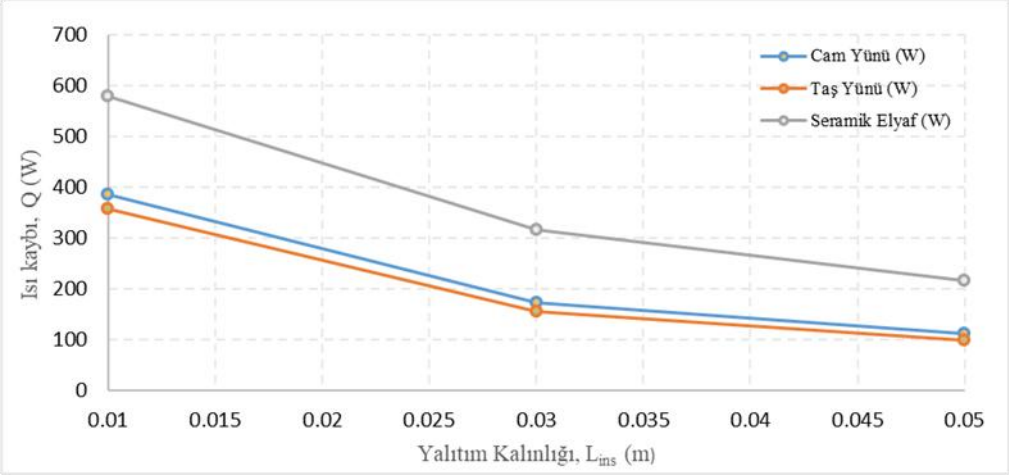
Bu bölümde, öncelikle yalıtımsız referans durum (*S0*) için ısı kaybı, yıllık enerji kaybı ve yıllık maliyet değerleri hesaplanmıştır. Ardından cam yünü, taş yünü ve seramik elyaf yalıtım malzemeleri için üç farklı yalıtım kalınlığı (1, 3 ve 5 cm) dikkate alınarak aynı büyüklükler yeniden belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar referans durum ile karşılaştırılmış; buna bağlı olarak yıllık tasarruf ve ısı kaybı azaltım oranları hesaplanmıştır. Tüm bulgular Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Isıl ve ekonomik sonuçların karşılaştırılması.

Durum	Malzeme	Kalınlık (cm)	$\dot{Q}$ (W)	$E_{yıl}$ (kWh/yıl)	$C_{yıl}$ (TL/yıl)	Yıllık tasarruf (TL/yıl)	Isı kaybı azaltımı (%)
S0	Yalıtımsız	0	999.26	4996.30	26280.53	–	–
S1	Cam yünü	1	386.39	1931.96	10162.12	16118.43	61.33
S2		3	173.53	867.66	4563.88	21716.66	82.63
S3		5	111.89	559.46	2942.74	23337.79	88.80
S4	Taş yünü	1	356.82	1784.09	9384.34	16896.20	64.29
S5		3	156.09	780.45	4105.17	22175.36	84.38
S6		5	99.90	499.49	2627.31	23653.22	90.01
S7	Seramik elyaf	1	579.59	2897.94	15243.18	11037.35	42
S8		3	314.99	1574.94	8284.18	17996.35	68.49
S9		5	216.27	1081.33	5687.80	20592.73	78.36

Tablo 3 sonuçları, yalıtım uygulanmasıyla birlikte ısı kaybının, yıllık enerji kaybı ve yıllık maliyetin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Yalıtım kalınlığının artması, tüm malzemeler için daha düşük ısı kaybı ve daha yüksek tasarruf değerleri ile sonuçlanmıştır. İncelenen tüm durumlar arasında en düşük ısı kaybı ve en yüksek yıllık tasarruf değeri, 0.05 m kalınlıktaki taş yünü uygulamasında elde edilmiştir. Buna karşılık, seramik elyaf aynı kalınlıklarda diğer malzemelere göre daha yüksek ısı kaybı ve daha düşük tasarruf performansı göstermiştir.

Isı kaybının yalıtım kalınlığına bağlı değişimi, üç farklı yalıtım malzemesi için hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak Şekil 2'de verilmiştir.



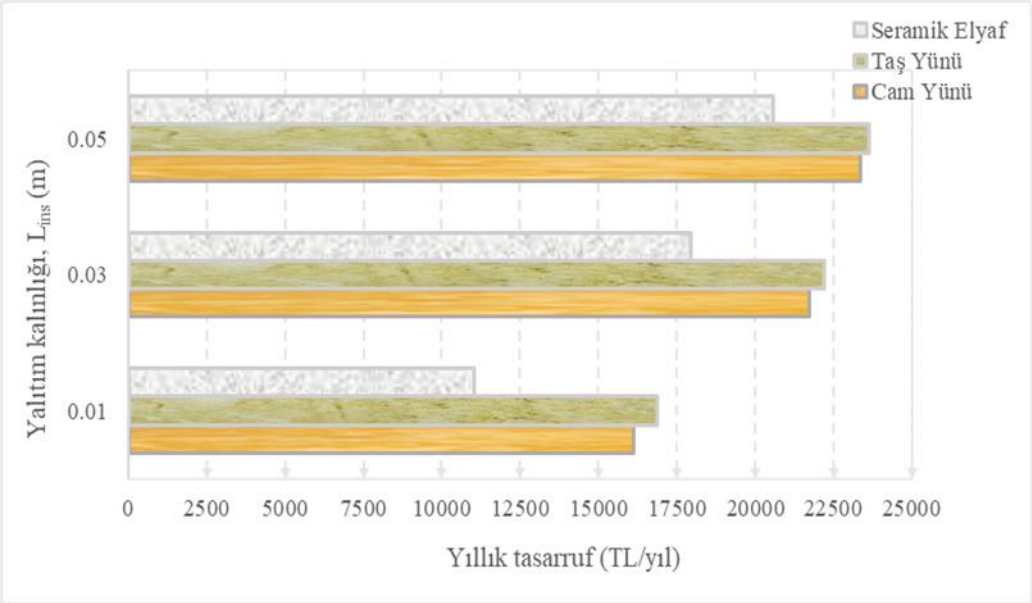
Şekil 2. Isı kaybının ($\dot{Q}$) yalıtım kalınlığına (L_{ins}) bağlı değişimi.

Şekil 2 incelendiğinde, yalıtım kalınlığının artmasıyla birlikte tüm malzemelerde ısı kaybının belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Cam yünü için ısı kaybı hızı 0.01 m kalınlıkta 386.39 W iken, 0.05 m kalınlıkta 111.89 W'a düşmüştür. Benzer şekilde taş yününde bu değer 356.82 W'tan 99.90 W'a, seramik

elyafta ise 579.59 W'tan 216.27 W'a gerilemiştir. Buna göre 0.01 m'den 0.05 m'ye geçildiğinde ısı kaybındaki azalma cam yününde yaklaşık %71, taş yününde yaklaşık %72 ve seramik elyafta yaklaşık %63 düzeyinde gerçekleşmiştir.

Aynı kalınlık seviyelerinde yapılan karşılaştırmada, en düşük ısı kaybı değerlerinin tüm durumlarda taş yünü malzemesinde elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum, taş yününün daha düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmasıyla uyumludur. Seramik elyaf ise tüm kalınlıklarda diğer iki malzemeye kıyasla daha yüksek ısı kaybı değerleri vermiştir. Sonuç olarak, yalnızca yalıtım kalınlığının artırılmasının değil, aynı zamanda uygun malzeme seçiminin de ısı kaybının azaltılmasında belirleyici bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Isı kaybındaki azalmanın yıllık ekonomik kazanca yansıması, yıllık tasarruf değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Yıllık tasarrufun yalıtım kalınlığına bağlı değişimi.

Şekil 3'e göre, yalıtım kalınlığının artması tüm malzemelerde yıllık tasarruf miktarını artırmıştır. Cam yününde yıllık tasarruf 1 cm kalınlıkta 16118.43 TL/yıl iken, 0.05 m kalınlıkta 23337.79 TL/yıl değerine ulaşmıştır. Taş yününde bu artış 16896.20 TL/yıldan 23653.22 TL/yıla çıkarken, seramik elyafta 11037.35 TL/yıldan 20592.73 TL/yıla yükselmiştir. Bu sonuçlar, kalınlık artışının enerji kaybını azaltarak doğrudan ekonomik fayda sağladığını göstermektedir.

Malzemeler karşılaştırıldığında, tüm kalınlık seviyelerinde en yüksek yıllık tasarruf değerleri taş yününde elde edilmiştir. Cam yünü taş yününe yakın sonuçlar verirken, seramik elyaf daha düşük tasarruf düzeyinde kalmıştır. Özellikle 0.05 m kalınlıkta taş yünü ile seramik elyaf arasında yaklaşık 3060 TL/yıl düzeyinde fark oluşması, malzeme seçiminin ekonomik performans açısından da önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, değerlendirilen koşullar altında taş yünü, hem ısıl performans hem de ekonomik kazanç bakımından en uygun yalıtım malzemesi olarak öne çıkmaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, cam yünü, taş yünü ve seramik elyaf yalıtım malzemelerinin farklı kalınlıklardaki ısıl ve ekonomik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yalıtım uygulamasının referans duruma göre ısı kaybını ve yıllık enerji maliyetini belirgin biçimde azalttığını göstermiştir.

Tüm malzemelerde yalıtım kalınlığının artırılmasıyla birlikte ısı kaybının azaldığı ve yıllık tasarrufun arttığı belirlenmiştir. İncelenen koşullar altında en yüksek performans taş yünü malzemesinde elde edilmiş; 0.05 m kalınlıkta ısı kaybı hızı 99.90 W'a düşerken, yıllık tasarruf 23653.22 TL/yıl düzeyine ulaşmıştır. Aynı durumda ısı kaybı azaltımı %90.01 olarak hesaplanmıştır. Cam yünü taş yününe yakın sonuçlar verirken, seramik elyafın aynı kalınlıklarda daha yüksek ısı kaybı ve daha düşük tasarruf değerleri verdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, uygun yalıtım malzemesi ve kalınlık seçiminin enerji kayıplarının azaltılması ve ekonomik kazanımın artırılması açısından kritik olduğu anlaşılmaktadır. Değerlendirilen koşullar altında taş yünü, hem ısıl hem de ekonomik performans bakımından en uygun seçenek olmuştur. Gelecek çalışmalarda

yatırım maliyeti, geri ödeme süresi ve farklı işletme koşullarının etkisinin de değerlendirilmesi, daha kapsamlı sonuçlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] International Energy Agency, Energy efficiency 2025: Industry, 2025. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/industry

[2] S. Kapp, J. K. Choi, and K. Kissock, "Toward energy-efficient industrial thermal systems for regional manufacturing facilities," Energy Reports, vol. 8, pp. 1377–1387, 2022.

[3] M. R. Alrasheed, "Optimizing the thickness of multilayer thermal insulation on different pipelines for minimizing overall cost-associated heat loss," Processes, vol. 12, no. 2, p. 318, 2024.

[4] M. Xu, M. Gao, R. Yang, K. Wang, and Z. Yuan, "Economic optimization of thermal insulation thickness for insulated and electrically traced pipelines in drilling applications," Processes, vol. 12, no. 7, p. 1506, 2024.

[5] A. Ali, A. Issa, and A. Elshaer, "A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings," Sustainability, vol. 16, no. 20, p. 8782, 2024.

[6] S. Suresh, M. Sundar, and B. R. Lokavarapu, "Optimum insulation thickness in process pipelines," Materials Today: Proceedings, 2023.

[7] M. Kayfeci, "Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials," Energy and Buildings, vol. 69, pp. 278–284, 2014.

[8] O. Kaynakli, "Economic thermal insulation thickness for pipes and ducts: A review study," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 30, pp. 184–194, 2014.

[9] M. Ertürk, "Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels and climate zones in Turkey," Energy, vol. 113, pp. 991–1003, 2016.

[10] Y. A. Çengel, Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.

[11] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2015.

[12] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.

[13] Knauf Insulation, Earthwool Glasswool Insulation: Building Product Information Sheet, [Online]. Available: https://knauf.com/api/downloadcenter/v1/assets/93485be9816b44bcaa2c46cca06e4799?country=nz&download=true

[14] ROCKWOOL, Full Fill Cavity Batt: Data Sheet, 2025. [Online]. Available: https://www.rockwool.com/syssiteassets/rw-uk/downloads/datasheets/full-fill-cavity-batt-datasheet2.pdf

[15] Darco, CBDXXX Ceramic Fiber Board: Technical Data Sheet, 2021. [Online]. Available: https://www.darco.com.au/files/CBDXXX.pdf

[16] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik faturalarına esas tarife tabloları, [Online]. Available: https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-100/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Comparative Analysis of the Effects of PET and PBT Chips on Draw Textured Yarn (DTY) Production Performance

Merve Dizdar Çelik, Gül Kırış, Buket İsmailoğlu

Küçükalık Tekstil San. Tic. A.Ş.
* **Corresponding Author:** merve.dizdar@kfssentetik.com

ABSTRACT

In this study, the physical and chemical properties of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(butylene terephthalate) (PBT) polymers, along with the physical properties of draw textured yarns (DTY) produced from these polymers, were examined comparatively. Within the scope of the study, intrinsic viscosity (IV), melting point, and moisture content were evaluated in the polymer analyses. Physical properties such as breaking strength, elongation at break, boiling water shrinkage, crimp properties, and interlace (point) levels were analysed. Furthermore, it was observed that PBT DTY and PET DTY yarns possess similar breaking strength and elongation at break values. It was found that boiling water shrinkage properties were higher in PBT-based yarns, whereas crimp properties were lower in PET yarns compared to PBT yarns. Upon examining the CIELAB values of samples dyed with the same dyestuff, it was observed that the dyeability of PBT-based DTY samples increased relative to PET DTY samples in conjunction with the increase in crimp properties. In conclusion, it was determined that the performance of DTY yarns varies significantly depending on the type of polymer used. Correct polymer selection, based on the intended use, is a critical parameter that directly affects not only the polymer rheology but also the final product characteristics.

Keywords: *Poly(ethylene terephthalate), Poly(butylene terephthalate), DTY, Viscosity, Melting point.*

I. INTRODUCTION

Product diversity and performance in synthetic yarns depend directly on the raw material structure and the polymer technologies utilized.Poly(ethylene terephthalate) (PET) and Poly(butylene terephthalate) (PBT), which are the most fundamental representatives of the polyester group, exhibit complementary properties in draw textured yarn production due to the differences in their molecular chain structures. While PET provides structural stability with its high crystallinity and strength; PBT offers dyeability at lower temperatures and superior recovery performance thanks to the flexibility imparted by the butylene glycol units.

In this study, the effects of two different polymer structures on the physical and aesthetic performance of DTY yarns were experimentally investigated.

Within the scope of the research, intrinsic viscosity and DSC analyses were performed for raw material characterization; subsequently, POY (Partially Oriented Yarn) with a structure of 125 denier 36 filaments was produced from both polymers.

The produced POY samples were converted into single-ply, high-interlaced yarns (DTY) with a value of 75 denier 36 filaments through the texturing process [13].

In the subsequent stages of the study, to determine the effects of DTY yarns on the final product, the samples were converted into a knitted structure and dyed at 130°C using the HT (High Temperature) method, and their characteristic changes were observed. This study aims to provide a technical dataset for raw material selection processes in the industry by revealing the relationship between the production parameters of PET and PBT-based DTY yarns and their color fastness values after dyeing.

II. Material and Method

In this study, a systematic methodology covering raw material characterization and production processes was followed to determine the effects of PET and PBT polymers on draw textured yarn performance.

A. Raw Material Analysis Methods

To determine the physical, thermal, and chemical properties of the PET and PBT polymer chips used in the study, and to investigate their effects on draw textured yarn (DTY) production performance, the following raw material characterization tests were performed:

Intrinsic Viscosity (IV) Determination: To determine the molecular weight distribution of the polymers, a 0.125 g chip sample was dissolved in a solvent mixture containing 60% phenol and 40% 1,2-dichlorobenzene by weight. Measurements were carried out at a constant temperature of 25°C [1]. Using the Ubbelohde capillary viscometer method; each sample was analyzed in 10 replicates for statistical accuracy.

Carboxyl End Group (COOH) Analysis: To determine the amount of reactive carboxyl groups at the polymer chain ends, a 3 g sample was completely dissolved in o-cresol. Following dissolution, 10 replicate titration measurements were performed at 25°C using an automatic titrator [2].

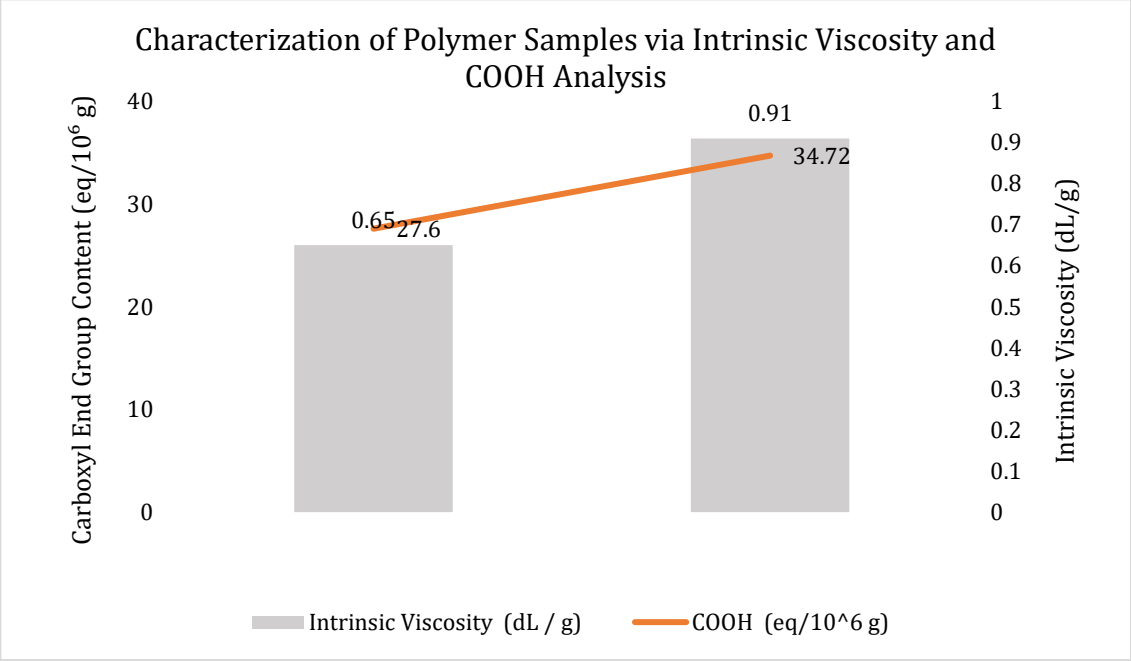


Figure 1. Correlation between the intrinsic viscosity (IV) and carboxyl end group (COOH) content of the polymer samples. Gray bars represent intrinsic viscosity (dL/g) measured by the Ubbelohde capillary viscometer method at 25°C, while the orange line indicates the COOH content (eq/10^6 g) determined via automatic titration.

Thermal Analysis (DSC): Thermal transition behaviors, including melting points (Tm), glass transition temperatures (Tg), and crystallization phenomena of the polymers, were determined using a Differential Scanning Calorimetry (DSC) instrument. The measurements were conducted under a nitrogen (N2) atmosphere [3]. With a heating rate of 10°C/min, applying a controlled temperature program from 30°C to 300°C (including 1st heating, cooling, and 2nd heating cycles).

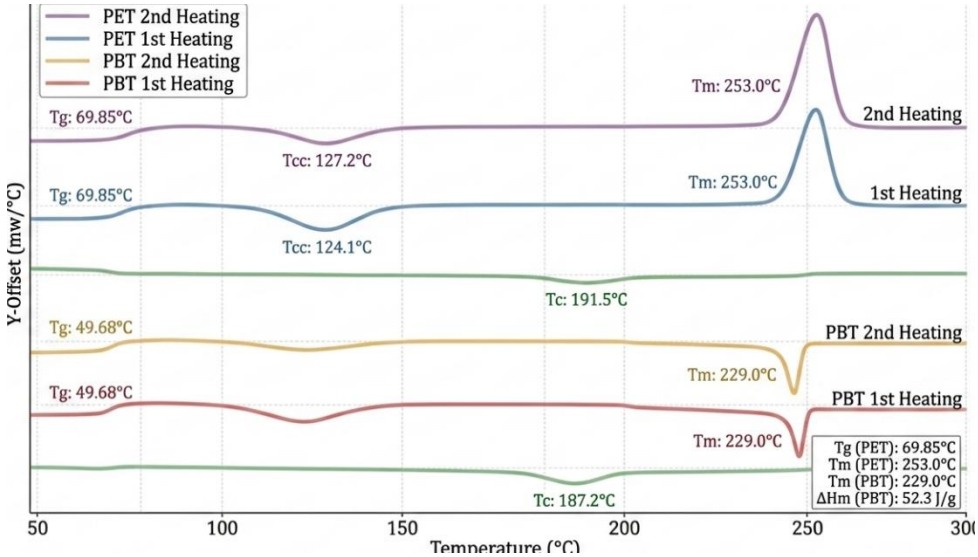


Figure 2. DSC thermograms of PET (Tm = 253.0°C) and PBT (Tm = 229.0°C) polymers during the first and second heating/cooling cycles. The inset box summarizes the comparative thermal transition parameters (Tg, T_m,).

Physical Parameters: The moisture content (PPM), color values (L*, a*, b*), and the number of chips per gram of the samples were determined according to standard laboratory protocols.

Table 1. Comparative Analysis Results of PBT and PET Polymers

Test Parameters	PBT	PES
Intrinsic Viscosity (dL/g)	0,91	0,65
Melting Point (C)	229,00	253,00
Moisture Content (ppm)	811,41	1241,10
Chip Count (chips/g)	40	38
Color Measurement L*	89,47	85,00
Color Measurement a*	-1,14	-1,85
Color Measurement b*	3,42	5,72
Carboxyl End Group (COOH) (eq/10^6 g)	34,72	27,60

B. DTY Yarn Performance Analyses

Comprehensive test modules were applied to determine the physical and mechanical characteristics of the produced draw textured yarns. To ensure the statistical accuracy of the obtained data, 20 independent trials were conducted for each parameter from each sample, and the results were recorded as the arithmetic mean of these measurements.

The applied test methodologies and reference standards are presented below:

Yarn Count Determination (Denier): Yarn count was determined in denier (den) according to the DIN EN ISO 2060 standard [4]. And the number of filaments was determined according to the DIN EN ISO 2062 standard.

Mechanical Properties: Elongation at break (%) and tenacity (g/den) values were measured on high-precision testing devices in accordance with DIN EN ISO 2062 [5,6].

Oil Content Determination: The amount of spin finish oil on the yarns was determined on a percentage (%) basis using the NMR Method (Bruker) [7].

Hot Air Shrinkage (Boiling Shrinkage): To measure the thermal stability of the yarns, shrinkage tests under hot air were applied according to the DIN EN 14621 standard [8].

Interlace (Point) Analyses: Interlace count (points/m) and interlace stability (%) values were analysed using the KFS method.

Crimp Characteristics: Crimp Contraction (E%), Crimp Modulus (K%), and Crimp Stability (B%) values, which determine the texturing performance of the yarns, were measured in accordance with the DIN 53840 standard [9].

Table 2. Comparison of analysis results of PBT and PET DTY yarns

TEST NAME	UNIT	METHOD	PBT DTY	PES DTY
YARN COUNT	DENIER	DIN EN ISO 2060	75,00	75,00
FILAMENT COUNT	PIECES	DIN EN ISO 2062	36,00	36,00
ELONGATION	%	DIN EN ISO 2062	19,43	21,50
TENACITY	G/DENIER	KFS METHOD	3,29	3,94
OIL	%	NMR Method/Bruker	1,38	1,50
HOT AIR SHRINKAGE	%	DIN EN 14621	14,24	5,53
INTERLACE COUNT	POINTS/M	KFS METHOD	112	105
INTERLACE STABILITY	%	KFS METHOD	86	91
CRIMP CONTRACTION (E%)	%	DIN 53840	42,44	28,46
CRIMP MODULUS (K%)	%	DIN 53840	21,49	16,98
CRIMP STABILITY (B%)	%	DIN 53840	78,49	76,44

C. Knitted Fabric Production, Dyeing Conditions, and Evaluation Methods

To comparatively investigate the dye uptake behavior and final product characteristics of the textured PET and PBT yarns, the samples were processed into a combined knitted fabric structure. The resulting knitted fabric was then subjected to a dyeing process at 130°C using the HT (High Temperature) method in a laboratory-scale dyeing machine [14].

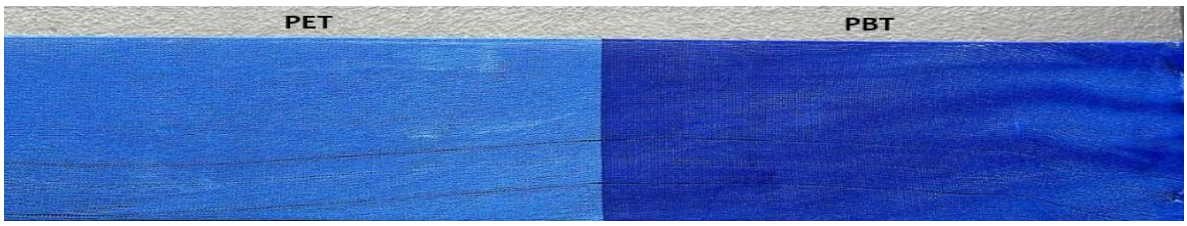


Figure 3. Comparison of dye uptake of knitted fabrics

Following the dyeing process, the dye uptake behavior, color evenness (uniformity), and color fastness performance of the obtained samples were objectively evaluated through visual and spectrophotometric analyses in accordance with international Gray Scale (ISO 105-A02 / ISO 105-A03) standards [10,11].

Table 3. Evaluation of dye uptake of knitted fabrics

Property	PET	PBT
Dye Uptake	Lower	Higher
Color Evenness	Medium	Better
Gray Scale Value	3–4	4–5
Color Fastness Performance	Good	Very Good

In the post-dyeing visual and spectrophotometric analyses, it was observed that PBT-based knitted fabrics achieved a significantly darker, deeper, and more uniform color depth compared to PET samples. In the Gray Scale evaluation for color change, while PET fabrics remained at a level of 3–4, PBT fabrics exhibited superior dyeing quality with a value of 4–5.

III. RESULTS

Thermal and Physical Raw Material Trends: In DSC analyses, the melting point of the PET polymer was determined as 253°C, while the melting point of the PBT polymer was measured as 229°C. Regarding intrinsic viscosity (IV) values, PBT (0.91 dL/g) exhibited a higher trend compared to PET (0.65 dL/g).

DTY Mechanical and Crimp Characteristics: In mechanical tests, PET DTY yarn showed higher breaking strength (tenacity) (3.94 g/den), whereas PBT DTY yarn recorded a clear numerical superiority against PET in Crimp Contraction (42.44%) and Crimp Stability (78.49%).

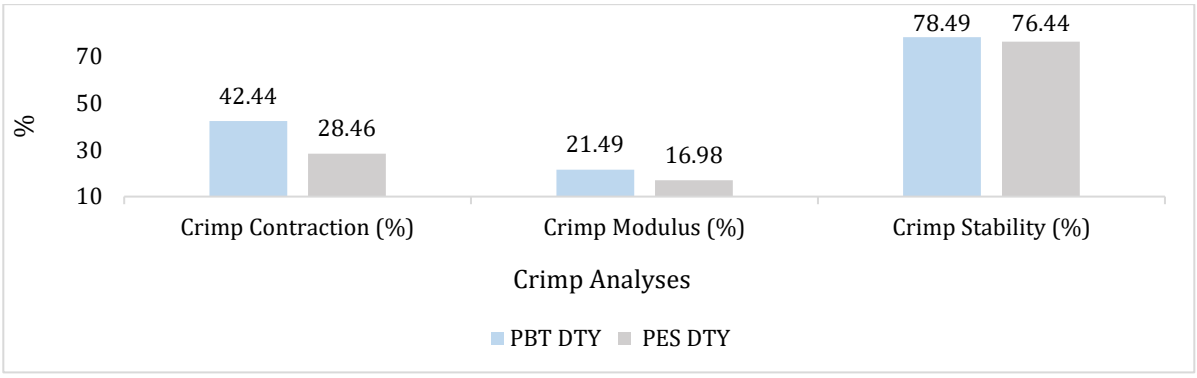


Figure 4. Crimp analysis results (Crimp Contraction, Crimp Modulus, and Crimp Stability) for PBT and PES Draw Textured Yarns.

Thermal Shrinkage: In hot air shrinkage tests, PBT yarn exhibited a high shrinkage rate of 14.24%, while this rate remained at 5.53% for PET yarn.

Dye Uptake Values: In spectrophotometric and visual analyses, it was determined that after 130°C HT dyeing, PBT DTY yarn reached a significantly darker and more uniform color depth compared to PET, and in the Gray Scale evaluation, PBT received a value of 4–5, while PET received a value of 3–4.

IV. Discussion

The obtained results show that the performance differences between PET and PBT fundamentally originate from the polymer chain structure [12]. The more flexible chain structure of PBT caused both a lower melting temperature and higher chain mobility, thereby improving texturing and dyeability properties [12,15].

On the other hand, PET offers higher mechanical strength and thermal stability thanks to its more regular and highly crystalline structure [15]. This situation is consistent with the literature where PET exhibits a more rigid and durable structure. The findings also indicate that the difference in glass transition temperature (T_g) is particularly decisive on dyeing behavior. The lower T_g value of PBT facilitated dyestuff diffusion, enabling higher color depth to be obtained [16]. This result demonstrates that dyeability performance in polyesters depends not only on processing conditions but also on raw material selection [16].

V. Conclusion

This study has revealed the characteristic differences of PET and PBT polymers in DTY yarn performance. While PET yarns offer ideal performance for technical textiles with their high strength and thermal dimensional stability PBT yarns provide the advantages of superior elasticity/bulkiness with high crimp capability, energy savings in production with a low melting temperature, and easy carrier-free dyeability with a low glass transition temperature. In conclusion, PBT DTY stands out as a sustainable and value-added alternative raw material for functional textile designs where a combination of high elasticity, comfortable hand-feel, and deep color is targeted.

References

[1] Mishra, S. P. (2000). A Textbook of Polymer Science (1st ed.). New Delhi: New Age International Publishers.
[2] Pohl, H. A. (1954). Determination of carboxyl end groups in poly(ethylene terephthalate). Analytical Chemistry, 26(10), 1614–1616.
[3] Fakir, A. U., & Ajji, A. (2008). Properties and crystallization behavior of poly(ethylene terephthalate) and poly(butylene terephthalate) blends and fibers. Journal of Applied Polymer Science, 108(4), 2134–2142.
[4] Deutsches Institut für Normung. (2002). Textiles - Yarns from packages - Determination of linear density (mass per unit length) by the skein method (DIN EN ISO 2060). Berlin: Beuth Verlag.
[5] Deutsches Institut für Normung. (2009). Textiles - Yarns from packages - Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester (DIN EN ISO 2062). Berlin: Beuth Verlag.
[6] KFS Sentetik. (2026). KFS Internal Laboratory Test and Analysis Methods: Procedures for Tenacity, Interlace Count, and Interlace Stability (Unpublished Internal Report). Bursa: Küçükalık Tekstil San. Tic. A.Ş.
[7] Bruker Corporation. (2024). Determination of Spin Finish Oil Content on Synthetic Fibers via Time-Domain Nuclear Magnetic Resonance (TD-NMR) (Bruker Application Note Comp-88). Rheinstetten, Germany.
[8] Deutsches Institut für Normung. (2005). Textiles - Multifilament yarns - Determination of boiling water shrinkage (DIN EN 14621). Berlin: Beuth Verlag.
[9] Deutsches Institut für Normung. (1992). Testing of textiles; determination of textured filament yarns; crimp contraction, crimp modulus, crimp stability (DIN 53840). Berlin: Beuth Verlag.
[10] International Organization for Standardization. (2005). Textiles — Tests for colour fastness — Part A02: Grey scale for assessing change in colour (ISO Standard No. 105-A02).
[11] International Organization for Standardization. (2019). Textiles — Tests for colour fastness — Part A03: Grey scale for assessing staining (ISO Standard No. 105-A03).

[12] Gupta, V. B., & Kothari, V. K. (1997). Manufactured Fibre Technology (1st ed.). London: Chapman & Hall.
[13] Hearle, J. W. S., Hollick, L., & Wilson, D. K. (2001). Yarn Texturing Technology (1st ed.). Cambridge: Woodhead Publishing.
[14] Trotman, E. R. (1984). Dyeing and Chemical Technology of Textile Fibres (6th ed.). London: Charles Griffin & Company.
[15] Ward, I. M., & Wilding, M. A. (1977). Infrared and Raman spectra of poly(ethylene terephthalate) and poly(butylene terephthalate) in relation to their crystalline structures and mechanical properties. Polymer, 18(4), 327–335.
[16] Yang, Y., & Li, S. (2014). High-temperature dyeing kinetics and mechanism of carrier-free poly(butylene terephthalate) (PBT) textured yarns. Coloration Technology, 130(3), 185–192.

www.iners.duzce.edu.tr

6. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu
07-09 Mayıs 2026, Düzce/Türkiye

6th International Engineering Research Symposium
07-09 May 2026, Düzce/Türkiye
ISBN: 978-625-6330-27-6

Derin Evrişimli Sinir Ağları ve Vektörel Benzerlik Metrikleri ile Bir Otomatik Pişirme Planlaması Sistemi Tasarımı

Nurdanur Pehlivan[a], Resul Kara[b]*

[a]Düzce Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği (DKT), Düzce/Türkiye.
[a]Doğuş Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği (Araştırma Görevlisi), İstanbul/Türkiye.
[b]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.
* **Sorumlu Yazar:** npehlivan@dogus.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, ev tipi fırınlarda pişirilecek olan yiyeceklerin görsellerinden otomatik pişirme parametreleri (süre, derece, mod) elde etmek amacıyla geliştirilen bir sistemi sunmaktadır. Geleneksel evrişimli sinir ağları (CNN), kapalı küme sınıflandırma prensibiyle çalıştığından yeni bir görsel eklendiğinde modelin mimarisinin değiştirilmesi ve tüm veri setinin yeniden eğitilmesi gerektiğinden gerçek zamanlı mutfak uygulamalarında zorluk oluşturmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla geliştirilen sistemde, MobileNetv2 mimarisi klasik bir sınıflandırıcı yerine yüksek boyutlu bir öznitelik çıkarıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada, görüntüler 224 x 224 piksel boyutuna getirilerek ImageNet istatistikleri üzerinden Z-skoru normalizasyonuna sokulmuştur. Elde edilen 1280 boyutlu öznitelik vektörleri, referans veri kümesindeki vektörlerle kosinüs benzerliği metriği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, sistemin yeni sınıfları öğrenmek için sıfır eğitim süresine (zero-shot learning capability) ihtiyaç duyduğunu ve 0.45 olarak belirlenen optimum eşik değeriyle farklı ışık, renk ve çeşitli gürültülerde bile yüksek ayırt edicilik göstermiştir. Sonuç olarak, geliştirilen model hem düşük donanım kaynaklı cihazlarda gerçek zamanlı çalışabilme kabiliyeti hem de veri yönetimi esnekliği ile mutfak otomasyonu literatürüne önemli bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Derin öğrenme, Görüntü işleme, Mobilenetv2, Öznitelik çıkarımı, Yapay zeka.*

Design of an Automated Cooking Planning System Using Deep Convolutional Neural Networks and Vector Similarity Metrics

ABSTRACT

This study presents a system developed to automatically obtain cooking parameters (time, temperature, mode) from images of food to be cooked in home ovens. Traditional convolutional neural networks (CNNs) operate on the principle of closed-set classification, which poses challenges in real-time kitchen applications because adding a new image rewuires changing the model architecture and retraining the entire dataset. To overcome this problem, the system uses the MobileNetV2 architectures as a high-dimensional feature extractor instead of a classical classifier. In this study, images were resized to 224 x 224 pixels and subjected to Z-score normalization via ImageNet statistics. The resulting 1280-dimensional feature vectors were compared with vectors in the reference dataset using the cosine similarity metric. Experimental results show that the system requires zero training time (zero-shot learning capability) to learn new classes and exhibits high discrimination even under diffrent lighting, color, and noise levels with an optimum threshold value of 0.45. In conclusion, the developed model makes a significant contribution to the kitchen automation literatüre with its ability to operate in real-time on low-resource devices and its data management flexibility.

Keywords: *Deep learning, Feature extraction, Image processing, Artificial intelligence.*

I. GIRIŞ

Güncel literatürde görüntü tanıma sistemleri çoğunlukla denetimli öğrenme (supervised learning) ve sabit sınıflı çıktı katmanları üzerine inşa edilmektedir. Ancak, mutfak ortamındaki kullanıcı etkileşiminin yüksek ve veri girişinin dinamik olduğu ortamlarda, bu geleneksel yaklaşım iki temel teknik sorun ile karşılaşmaktadır. Bu sorunlardan ilki, sisteme yeni bir kategori eklendiğinde modelin son katmanının (softmax) yeniden yapılandırılması ve tüm ağın veya ilgili katmanların yeniden eğitilmesi (re-training) problemidir. Bu durum, hem yüksek hesaplama maliyeti doğurmakta hem de bazı cihazlarda (örn. Edge devices) uygulanabilirliği imkansızhale getirmektedir. İkinci sorun ise, literatürde Katastrofik Unutma (Catastrophic Forgetting) olarak bilinen modelin yeni bilgileri öğrenirken daha önce optimize edildiği öznitelik uzayındaki eski bilgileri kaybetme riskidir. Ayrıca mutfak ortamlarındaki aydınlatma, buhar vs sebeplere bağlı gürültüler nedeniyle sabit sınıflı modellerin genelleme yeteneğini kısıtlamakta ve yanlış parametre eşleşmelerine bağlı güvenlik risklerini artırmaktadır.

Nesnelerin İnterneti (IoT-Internet of Things) ve akllı mutfak teknolojilerinin gelişimi, kullanıcı etkileşimini minimize eden otonom sistemlere olan ihtiyacı artırmıştır. Ev otomasyonu pazarındaki büyüme, mutfak cihazlarının öğrenen sistemler olmasını zorunlu kılmaya başlamaktadır. Mutfak ortamındaki görsel tanıma çeşitlilik nedeniyle karmaşık bir sorundur. Akıllı fırınlar için ise temel zorluk, pişirilecek yiyeceklerin doğru tanımlanması ve buna uygun parametrelerin dinamik olarak eşleştirilmesidir. Bu çalışmada, görsel tabanlı bir tanımlama sistemi ile bu tanıma uygun pişirme protokolleri gibi teknik verileri sunan hibrit bir mimari önerilmektedir.

Ayrıca bu çalışma, literatürdeki derin öğrenme modellerinin statik yapısı ile gerçek zamanlı mutfak senaryolarının dinamik gereksinimleri arasındaki uyumsuzluğu gidermek amacıyla yeniden eğitim maliyetini sıfırlayan özgün bir mimari sunmaktadır.

II. LITERATÜR TARAMASI

Gıda tanıma ve içerik analizi üzerine yapılan çalışmalar, derin öğrenme mimarilerinin klasik görüntü işleme yöntemlerine üstünlüğünü kanıtlamıştır.

He ve ark. (2015) tarafından sunulan Deep Residual Learning (ResNet), çok katmanlı ağlarda gradyan kaybolması sorununu çözerek derin öznitelik çıkarımında yeni bir dönem açmıştır. Ancak bu modellerin hesaplama maliyeti, mobil ve gömülü sistemler için bir kısıt oluşturmaktadır [1].

Sandler ve ark. (2018) tarafından önerilen MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks çalışması, "Depthwise Separable Convolution" kullanrak düşük parametre sayısıyla yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamıştır [2].

Liu ve ark. (2016), DeepFood çalışmasında gıda maddelerinin tanınmasında evrişimli sinir ağlarının (CNN) %90'ın üzerinde doğruluk sağladığını göstermiştir [3].

Shütze ve ark. (2008), An Introduction to Information Retrieval kitabında, yüksek boyutlu vektör uzaylarında yönsel yakınlığın (angular proximity), Öklid mesafesine göresemantik eşleşmelerde daha başarılı olduğunu belirtmiştir [4].

Min ve ark. (2023) tarafından Deep Learning in Food Computing: A Survey isimli çalışmada, yemek tanıma teknolojilerindeki son trendleri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Yazarlar, klasik sınıflandırma modellerinin genişleyen menüler karşısında ölçeklenebilirlik sorunu yaşadığını ve Few-Shot Learning (az veriyle öğrenme) yaklaşımlarının mutfak robotları için zorunluluk haline geldiğini vurgulamaktadır [5].

Me ve ark. (2022) tarafından Towards Fine-Grained Food Recognition with Lighweight Networks çalışmasında, sınırlı donanım kaynaklarına sahip akıllı cihazlarda MobileNetV3 ve türevlerinin performansını analiz etmişlerdir. Çalışmada, yüksek boyutlu öznitelik vektörlerinin benzerlik tabanlı eşleştirilmesinin, geleneksel son katman sınıflandırmasına göre %15 daha az bellek tükettiği kanıtlanmıştır [6].

Jalal ve ark. (2021), Feature Extraction and Cosine Similarity for Intelligent Edge Systems çalışmalarına ait makalede, IoT tabanlı görüntü işleme süreçlerinde öznitelik çıkarımı ve kosinüs benzerliği kombinasyonunun sağlamlığını tartışmışlardır. Yazarlar, öklid mesafesinin aksine kosinüs benzerliğinin vektör büyüklüğünden bağımsız olması sayesinde, değişken ışık altındaki nesneleri tanımada daha başarılı olduğunu göstermişlerdir [7].

Chen ve ark. (2020) ait A New Strategy for Open-Set Recognition in Food Images çalışmasında, sistemin daha önce hiç görmediği bir yemeği "bilinmeyen" olarak işaretlemesi üzerine odaklanmışlardır. Eşikleme yönteminin, yanlış pozitif oranını düşürmedeki kritik rolünü deneysel olarak sunmuşlardır [8].

Zhang ve ark. (2024) ait Edge AI for Smart Home Appliances: A Real-Time Cooking Montoring Perspective çalışmalarında, mutfak cihazlarındaki işlemci kısıtlarını ele almışlardır. MobileNetV2 gibi mimarilerin öznitelik çıkarıcı olarak kullanılmasının buluta veri göndermeden 0.5 saniyenin altında karar verme yeteneği sunduğunu belirtmişlerdir [9].

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, yemek tanıma sistemlerinde aşağıdaki gibi bazı eksiklikler tespit edilmiştir.

- Literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğu önceden tanımlanmış sabit sınıflar üzerine kurulmuştur. Ancak gerçek bir mutfakta kullanıcı, farklı tarifler eklemek isteyebilir. Mevcut

literatür, bu yeni veriyi sisteme dahil etmek için modelin yeniden eğitilmesi gerekmektedir. Bu sorunu çözmek için bu çalışmada, sistem, bir "sınıflandırıcı" olarak değil bir "öznitelik çıkarıcı" olarak tasarlandı. Bu sayede, literatürdeki yeniden eğitim maliyeti sorunu ortadan kaldırılmış oldu.

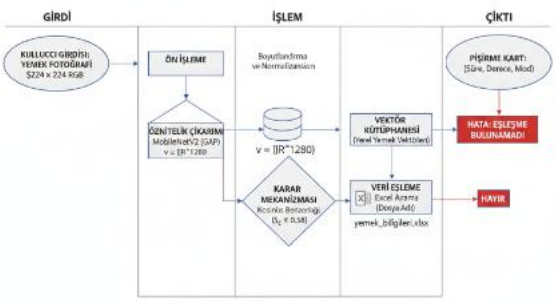
- Literatürde yer alan akademik makaleler genellikle yemeğin ne olduğunu yüksek doğrulukla bulmaya odaklanmaktadır. Ancak yemeği tanıdıktan sonra ne yapılması gerektiği konusunda yetersiz kalmaktadırlar. Önerdiğimiz sistemde, en yakın benzerliğe sahip görselin ID'si bulunur ve bu ID üzerinden ilgili pişirme parametreleri kullanıcıya verilir. Bu sayede görsel tanıma projesi biraz daha genişletilerek kontrol sistemine de dönüştürülmüş oldu.
- ResNet, Vision Transformers gibi gelişmiş derin öğrenme modelleri çok yüksek işlem gücü gerektirmektedir. Ev tipi mutfak cihazlarında bu işlemcinin çalıştırılması maliyeti arttıracaktır. Bu derin öğrenme modelleri yerine MobileNetV2 kullanarak model boyutu küçültülmüştür. Bu sayede sistem, CPU gerektirmeden bile çok hızlı sürede karar verebilmektedir.
- Literatürde "tanınmayan nesne" yönetimi genellikle karmaşık olasılık hesapları ile yapılmaktadır. Önerdiğimiz sistemde kullanılan dinamik eşikleme yöntemi, pratik, hızlı ve güvenli bir filtreleme mekanizması sunarak mutfak güvenliği için literatüre basit ama etkili bir çözüm sunmaktadır.

III. MATERYAL METOT

Önerilen sistem, geleneksel sınıflandırma katmanlarının oluşturduğu esneklik kaybını gidermek amacıyla, derin öğrenmenin bir karar verici olması yerine yüksek boyutlu bir öznitelik çıkarıcı olarak kullanılmaktadır.

Sistem temel olarak dört ana adımdan oluşmaktadır.

1. Giriş: Fırının dışında bulunan kameradan görüntü gelir.
2. Öznitelik Çıkarımı: Yapay zeka, bu görüntünün benzersiz bir sayısal parmak izini oluşturur.
3. Vektörel Karşılaştırma: Bu parmak izi, bilgisayardaki kayıtlı yemeklerin parmak izleriyle karşılaştırılır ve en benzer olanı seçilir.
4. Veri Erişimi: En benzer görüntünün ismi üzerinden veri tablosuna gidilir ve ilgili pişirme bilgileri çekilir.



Şekil 1. Sistem Akış Şeması

Şekil 1'de görüldüğü üzere, sistem doğrusal olmayan bir veri akışını takip etmektedir. Ham görüntü verisi, evrişimli katmanlardan geçerek yüksek boyutlu bir öznitelik vektörüne indirgenmekte; ardından bu vektör, referans kütüphanesindeki adaylarla matematiksel olarak kıyaslanmaktadır. Son aşamada, doğrulanmış görsel kimliği üzerinden ilişkisel veri tabanından semantik bilgiler çekilerek kullanıcı arayüzüne iletilmektedir.

A. Öznitelik Çıkarımı ve Mimari

Sistem , girdi olarak alınan görüntüyü 224 x 224 piksel boyutuna normalize eder. Öznitelik çıkarıcı olarak kullanılan MobileNetV2, son sınıflandırma katmanı kaldırılarak bir öznitelik çıkarıcı olarak yapılandırılmıştır. Bu sayede model, görüntüyü 1280 boyutlu bir öznitelik vektörüne $(v \in \mathbb{R}^{1280})$ dönüştürür. Bu aşamada, modelin son sınıflandırma katmanı devre dışı bırakılır ve bu katman yerine ağın evrişimsel katmanlarından elde edilen öznitelikler bir embedding vektör haline getirilir. Bu sayede her yiyecek görseli, ilgili görselin morfolojik ve dokusal özelliklerini temsil eden matematiksel bir parmak izi olarak kodlanmış olur.

B. Benzerlik Metriği ve Karşılaştırma

Tanıma işlemi, sorgu görseline ait vektör (Q) ile referans kütüphanesindeki vektörler (R) arasındaki açısal benzerliğin hesaplanmasına dayanır. Kosinüs benzerliği metriği, vektörlerin büyüklüğünden ziyade yönelimine odaklandığı için düşük ışıklı veya düşük kontrastlı görüntülerde Öklid mesafesine göre daha

kararlı sonuçlar vermektedir. Karar aşamasında uygulanan T=0.45 eşik değeri (thresholding), sistemin açık küme karekteristiğini belirlemektedir. Bu eşik değerin altında kalan skorlar "Bilinmeyen Nesne" olarak sınıflandırılarak yanlış eşleşme riski ortadan kaldırılmıştır. Kesin eşleşme sağlandığında yemeğin adı ve pişirme parametreleri gibi ilişkili veriler kullanıcıya verilmektedir.

Eşleşme işlemi, aday görüntülerin vektörleri arasında Kosinüs Benzerliği (S_c) hesaplanarak gerçekleştirilir:

$$S_c(Q, R_i) = \frac{Q.R_i}{||Q||||R_i||}$$

Eşik değer (T=0.45) altındaki sonuçlar, "Tanımlanmayan Nesne" (out-of-distribution) olarak sınıflandırılır. Eşik değeri olarak 0.45 seçilmesinin nedeni, bu değerden düşük olduğunda Yanlış Pozitif (False Positive) oranının yükseldiği yani birbirine benzeyen yemeklerin karıştırıldığı, yüksek olduğunda ise Yanlış Negatif (False Negative) oranının arttığı yani görselde hafif gölgelenme olduğunda bile tanınmadığı saptandığındandır.

C. Veri Entegrasyonu ve Normalizasyon

Mutfak ortamındaki aydınlatma düzensizliklerini ve cihazlar arası renk sapmalarını minimize etmek amacıyla, görsellerin eğitim gördüğü ImageNet veri seti istatistikleri (μ ve σ) üzerinden Z-skoru normalizasyonu uygulanmaktadır. Bu işlem, veri dağılımını standart bir ölçeğe getirerek modelin sadece nesne formuna odaklanmasını ve çevresel değişikliklere karşı dirençli bir öznitelik çıkarımı yapmasını sağlamaktadır.

Görsel eşleşme sonrası elde edilen dosya adı anahtarı, ilişkisel bir veri tabanı üzerinden sorgulanır. Veri tabanı robustluğu için Metin Normalizasyonu (lowercase, strip, Unicode, vb.) uygulanarak karakter kodlama hataları önlenmiştir.

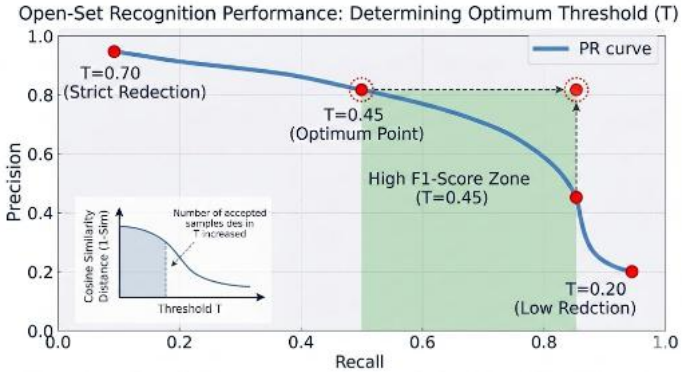
DENEYSEL BULGULAR VE ANALİZ

Sistem testleri, Apple M3 işlemcili, 8 çekirdekli CPU ve 10 çekirdekli GPU'ya sahip MacBook Air cihazda Visual Studio Code aracı üzerinde Python programlama dili kullanılarak yapılmıştır. Sistemin performansı, farklı gürültü seviyelerine sahip görüntüler üzerinde test edilmiştir. Testlerde kullanılan görseller tek bir cihazdan değil farklı cihazlar ile çekilmiş olan fotoğraflardan oluşmaktadır.

Tablo 1. Sistemin Sınıflandırma Performansı (Karmaşıklık Matrisi)

Gerçek/ Tahmin	**Pizza**	**Köfte**	**Makarna**	**Kek**	**Ekmek**	**Doğruluk (%)**
Pizza	10	0	0	0	0	100
Köfte	0	9	1	0	0	90
Makarna	0	0	10	0	0	100
Kek	0	0	0	8	2	80
Ekmek	0	0	0	1	9	90
Genel Ortalama						92

Tablo 1'de görüldüğü üzere, köşegen üzerindeki değerlerin yüksekliği sistemin True Positive (Doğru Pozitif) oranının başarısını kanıtlamaktadır. En belirgin hata payı Kek ve Ekmek arasında gözlemlenmiştir. Bunun temel sebebi, her iki gıda grubunun benzer yüzey dokusuna ve renk spektrumuna sahip olmasıdır. Bu durum, modelin Intra-class Variation (Sınıfici Varyasyon) ile Inter-class Similarity (Sınıflararası Benzerlik) arasındaki dengeyi kurarken karşılaştığı tek zorluktur. Toplam 50 test verisi üzerinden yapılan değerlendirmede sistem, ortalama %92 doğruluk oranına ulaşarak gerçek zamanlı uygulamalar için yeterli güvenilirliği sağladığını göstermiştir.



Şekil 2. Doğruluk (Precision)-Hassasiyet (Recall) Grafiği

Şekil 2'de, sistemin doğruluğu ve nesneleri tanıması arasındaki dengeyi gösteren Doğruluk-Hassasiyet eğrisi bulunmaktadır. Eğri üzerindeki farklı noktalar, Kosinüs Benzerliği için belirlenen farklı eşik değerlerini (T) sistem performansına etkisini temsil etmektedir. T=0.70 değerinde sistem çok seçicidir yani yanlış tanıma riski düşüktür ama görsellerin farklı varyasyonlarını tanımama ihtimali yüksektir. T=0.20 değerinde sistem çok kapsayıcıdır yani tüm nesneleri tanır ancak yabancı maddeleri yemekle karıştırma riski artmaktadır. Optimum nokta olan T=0.45 değeri yapılan testler sonucunda belirlenmiş ve sistemin hatalı eşleşmeleri engellerken gerçek içerikleri kaçırmamasını sağlayan en dengeli karar sınırıdır.

IV. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Önerilen sistem, derin öğrenme tabanlı görsel tanımlama ile geleneksel veri yönetim sistemlerini düşük maliyetli ve yüksek doğruluklu bir şekilde birleştirmektedir. Geleneksel sınıflandırma modellerinin en büyük kısıtı olan sabit sınıf bağımlılığı ve yeniden eğitim maliyeti, önerilen sistem ile aşılmıştır. Deney sonuçları, sistemin düşük donanım kaynakları ile bile gerçek zamanlı çıkarım yapabildiğini kanıtlamıştır.

Önerilen model, sadece görsel tanıma ile sınırlı kalmayıp ve görsel veriyi veri tabanında eşleştirerek gerçek dünya parametrelerine (pişme süresi, pişme sıcaklığı, pişme modu gibi) dönüştürülerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmuştur.

Gelecek çalışmalarda, veri seti artırılarak (hem yeni yiyecekler ile hem de yiyeceklerin çiğ, az pişmiş gibi farklı pişirme aşamalarını içeren çeşitli görseller ile) yeni çalışma yapılması ve Attention Mechanism (Dikkat Mekanizmaları) eklenerek tabağın içindeki birden fazla yiyeceğin eş zamanlı olarak tanımlanması hedeflenmektedir. Yine gelecek çalışmalarda fotoğraftan değil, videodan gelen anlık görüntü ile deneyler yapılması hedeflenmektedir. Modelin mevcut platformdaki başarısı referans alınarak daha farklı platformlarda (örn. Daha düşük maliyetli mikrodenetleyiciler) performans karşılaştırması yapılıp optimizasyon çalışmaları yapılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2024.06.01.1540 proje numarası ile desteklenmektedir.

Kaynaklar

[1] Kaiming He, Xianhyu Zhang, Shaoqing Ren, Kian Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, Computer Vision and PatternRecognition, 10 dec 2015, doi: 10.48550/arXiv.1512.03385
[2] Mark Sandler, Adrew Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, Liang-Chieh Chen, MobileNetv2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, pp.4510-4520.
[3] Christopher D. Manning, Prabhakar Raghavan, Hinrich Schütze, An Introduction to Information Retrieval, Cambridge University Press, 2009, Cambridge, England.
[4] Min, W. et.al. Deep learning in food computing: A survey. 2023, IEEE TPAMI.
[5] Ma, J. et.al. Towards fine-grained food recognition with lightweight networks, 2022, J. Food Process Eng.
[6] Jalal, A. et.al. Feature extraction and cosine similarity for intelligent edge systems. IEEE Access, 2021.
[7] Chen, L. et.al. A new strategy for open-set recognition in food images, 2020, CVPR.
[8] Zhang, Y. and Wang, H., Edge AI for smart home appliances, 2024, Internet of Things.
[9] J. Padhye, V. Firoiu, and D. Towsley, "A stochastic model of TCP Reno congestion avoidance and control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech. Rep. 99-02, 1999.