

ISSN: 1308-9072

Cilt: 36 / Sayı: 2 / Yıl: 2024

# FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ





**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**  
**Cilt:36, Sayı:2, Yıl: 2024**  
**ISSN: 1308 - 9072**

### **İletişim**

Fırat Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
23119, ELAZIĞ

**Tel: 0 424 212 27 07**  
**Faks: 0 424 236 99 55**  
**e-posta: [fenbilim@firat.edu.tr](mailto:fenbilim@firat.edu.tr)**

**Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.**

***Derginin Eski adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi***  
***Derginin Eski ISSN numarası: 1300-2708***

**<https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd>**



**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**

**Sahibi**

**Prof Dr. Fahrettin GÖKTAŞ**  
Fırat Üniversitesi Rektörü

**Genel Yayın Yönetmeni**

**Prof. Dr. Burhan ERGEN**  
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Baş Editör**

**Doç. Dr. Ferhat UÇAR**  
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yrd.

**Editör**

**Doç. Dr. Nida KATI**  
Fırat Ü. Teknoloji F. Öğretim Üyesi

**DANIŞMA KURULU**

<b>Umran S. İNAN</b>	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	<b>Cumali KINACI</b>	İ.T.Ü. Çevre Müh.
<b>Ali YAZICI</b>	Atılım Ü. Yazılım. Müh.	<b>Ülkü YETİŞ</b>	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
<b>Z. Hakan AKPOLAT</b>	F.S.M.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	<b>Eres SÖYLEMEZ</b>	O.D.T.Ü. Makine Müh.
<b>Serkan DAĞ</b>	O.D.T.Ü. Makine Müh.	<b>Ayşe DALOĞLU</b>	K.T.Ü. İnşaat Müh.
<b>Erkan ŞAHİNKAYA</b>	İ.M.Ü. Biyomühendislik	<b>Ali KARCI</b>	İnönü Ü. Bil. Müh.
<b>Temel SAVAŞKAN</b>	K.T.Ü. Makine Müh.	<b>Coskun BAYRAK</b>	Little Rock Ü Bilg. Bil.
<b>İlker B. TOPÇU</b>	Osmangazi Ü. İnş. Müh.	<b>Hükmü ORHAN</b>	Selçuk Ü. Jeoloji. Müh.
<b>Yetkin TATAR</b>	F.Ü. Bil. Müh.	<b>Mehmet CEBECİ</b>	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
<b>Mehmet ÖZKUL</b>	Pamukkale Ü. Jeoloji. Müh.	<b>Ertan GOKALP</b>	K.T.Ü. Harita. Müh.
<b>Hasan EFEOGLU</b>	A.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	<b>Erhan AKIN</b>	F.Ü. Bil. Müh.
<b>Ercan AKSOY</b>	F.Ü. Jeoloji Müh.	<b>Sezgin BAKIRDERE</b>	Y.T.Ü Kimya
<b>Mehmet YILMAZ</b>	F.Ü. İnşaat Müh.	<b>Yusuf CELAYİR</b>	F.Ü. İnşaat Müh.
<b>Nurhan ARSLAN</b>	F.Ü. Kimya Müh.	<b>Cafer BAL</b>	F.Ü. Mekatronik Müh.
<b>Hanifi GULDEMİR</b>	F.Ü.Tek. Elekt-Elktr. Müh.	<b>Nilgün GULEC</b>	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.



# Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

## 36-2, 2024

### İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Mg Difüzyonu Tekniği ile Türkiye’de Saflaştırılmış Bor Kullanılarak Üretilen MgB<sub>2</sub> için B Saflığının Süperiletkenlik Özellikleri Üzerine Etkisi**  
*Effect of B purity on MgB<sub>2</sub> superconductor prepared by Mg diffusion technique using Turkish Boron*  
**Özlem ÇİÇEK** ..... 521-534
- İnsansız Hava Araçlarında Nokta Bulutu Verisi Kullanılarak İniş Pisti Uygunluk Analizi**  
*Landing Runway Suitability Analysis Using Point Cloud Data in Unmanned Aerial Vehicles*  
**Ebru Karaköse, Melike Aksu** ..... 535-551
- Bellek Tabanlı LSTM ve GRU Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanarak BIST100 Endeks Tahmini**  
*Predicting the BIST100 Index Using Memory-Based LSTM and GRU Machine Learning Algorithms*  
**Yusuf ÇELİK** ..... 553-561
- Comparing Machine Learning Regression Models for Early-Age Compressive Strength Prediction of Recycled Aggregate Concrete**  
*Agrega türlerinin ve farklı oranlarda kullanımının geri dönüştürülmüş agrega beton basınç dayanımına etkisinin makine öğrenmesi regresyon modellemesi uyarlanarak değerlendirilmesi*  
**Muhammed ULUCAN, Güngör YILDIRIM, Bilal ALATAŞ, Kürşat Esat ALYAMAÇ, ...** ..... 563-580
- Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Bulanık Hata Türü ve Etkileri Analizi (Bulanık HTEA): Mobilya Sektöründe Bir Uygulama**  
*Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (Fuzzy FMEA): A Case Study at Furniture Company*  
**Naciye KARAKUZU, Seda KARADAĞ, Nilgün İNCE** ..... 581-591
- Noktasal Kontakta Sahip Zıplayan Robotta Duruş Anında Dengenin Sağlanması**  
*Maintaining Stability During Rest for Jumping Robot with Point Contact*  
**Halit HÜLAÇO** ..... 593-607
- Alzheimer Hastalığının Teşhisinde Görüntü Dönüştürücü (Vision Transformer) Yaklaşımı: Yenilikçi Bir İnceleme**  
*Vision Transformer Approach in the Diagnosis of Alzheimer’s Disease: An Innovative Review*  
**Mehmet Emre SERTKAYA, Burhan ERGEN** ..... 609-619
- Eksik Tahrikli Döner Ters Sarkaç Sisteminin Yukarı Yükseltilmesi için Enerji Tabanlı Doğrusal Olmayan Kontrol Algoritması ve Deneysel Doğrulaması**  
*Energy-Based Nonlinear Control Algorithm for Swing-Up of Underactuated Rotary Inverted Pendulum System and Its Experimental Verification*  
**Fatih ADIGÜZEL** ..... 621-639
- Hummers ve Askorbik Asit ile Kimyasal İndirgenme Metotlarında Döngüsel Yaklaşım**  
*The Cyclical Approach in Chemical Reduction Methods Using Hummers and Ascorbic Acid*  
**Esra Yılmaz MERTSOY, Enes BEKTAŞ, Mohammad Ruhul Amin BHUIYAN, Haluk KORUCU** ..... 641-650
- Kıyıya Dik Kum Barlarının Bitiş Noktasının Yapay Zeka Yöntemleriyle Tahmini**  
*Estimation of Ending points of Cross-Shore Sandbars using Artificial Intelligence Method*  
**Mert SABANCIOĞLU, Fatih ÜNEŞ, Mustafa DEMİRCİ, Bestami TAŞAR, Yunus Ziya KAYA** ..... 651-659

<b>11. Tarımsal Alanlardaki Yapılaşma Baskısını Azaltmak: Deliktaş Köyü Örneğinde Köy Gelişme Alanı ve İmar Uygulamaları</b> <i>Reducing Urbanization Pressure on Agricultural Lands: Village Development Area and Zoning Practices in the Example of Deliktaş Village</i> Aziz SARAÇOĞLU .....	661-675
<b>12. PV Panel ve PEM Yakıt Pilinden Oluşan Küçük Ölçekli Hibrid Sistemin Matematiksel Modeli Yaklaşımı</b> <i>Mathematical Model of Small-Scale Hybrid System Consisting of PV Panel and PEM Fuel Cell</i> Buğra YILMAZ, Muhsin Tunay GENÇOĞLU .....	677-693
<b>13. Silan Ajanları ile Modifiye Edilmiş Montmorillonit Katkılı Polimerik Kompozit Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu</b> <i>Fabrication and Characterization of Montmorillonite Doped Polymeric Composite Films Modified with Silane Agents</i> Şükran Melda ESKİTOROS TOĞAY, Aleyna YEŞİLYURT, Sema ÇÖRTOĞLU .....	695-704
<b>14. Türkiye'nin Enerji Talebi Tahmin Probleminin Çözümünde Regresyon Yöntemlerine Dayalı Yaklaşımlar</b> <i>Approaches Based on Regression Methods in Solving Turkey's Energy Demand Forecasting Problem</i> Seyit Alperen ÇELTEK .....	705-715
<b>15. Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)</b> <i>New Digital Forensics Investigation Process (NDFIP) Tesisi</i> Ramazan OĞUZ, Recep ERYİĞİT .....	717-724
<b>16. Modeling of Li-ion Battery Management System for Unmanned Aerial Vehicles</b> <i>İnsansız Hava Araçları için Li-iyon Batarya Yönetim Sisteminin Modellenmesi</i> Merve Nur KAYA, Zehra URAL BAYRAK .....	725-734
<b>17. Serpantinli Topraklarda Yetişen Teucrium Polium' un Bor Akümülayon Performansının İncelenmesi</b> <i>Investigation of Boron Accumulation Performance of Teucrium polium Grown in Serpentine Soils</i> Nevin KONAKCI .....	735-742
<b>18. Taguchi Deneysel Tasarımı ile Fiber Optik Kablo Üretimi Proses Optimizasyonu</b> <i>Fiber Optic Cable Production Process Optimization with Taguchi Experimental Design</i> İlker KARADAĞ, Sinan DÜNDAR, Ömer Faruk GÜRCAN .....	743-754
<b>19. Taşınabilir Bir Elektrikli Kanallı Fan Test Standı Geliştirilmesi</b> <i>Development of a Portable Electric Ducted Fan Test Stand Zinc Extraction</i> Emre KARA, Mustafa Çağatay ÖZYÜREK, Gamze GÜLSEREN, Ünal HAYTA .....	755-764
<b>20. Zeolit-Bentonit Karışımlarının Farklı Sıcaklıklar Altında Sıkıştırma İndisinin Hesaplanmasında Ampirik ve Deneysel Yöntemlerin Karşılaştırılması</b> <i>Comparison of Empirical and Experimental Methods in Calculating the Compression Index of Zeolite-Bentonite Mixtures</i> Esra GÜNERİ .....	765-773



21. **Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı, Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi**  
*Optimum Insulation Thickness, Environmental Impact and Condensation Analysis for Cold Climate Regions of Turkey*  
Sefa KİZİRGİL SARI, Ayça GÜLTEN ..... 775-793
22. **23 Kasım 2022 Düzce Depreminin (Mw 6,0) Bölgesel Sismisite ve Kuvvetli Yer Hareketleri Açısından Değerlendirilmesi**  
*Investigation Evaluation of 23 November 2022 Düzce Earthquake in terms of Regional Seismicity and Strong Ground Motions*  
Erdem BAYRAK, Kaan Hakan ÇOBAN ..... 795-807
23. **Güçlendirme İşlerinde Miktar Hatasına Bağlı Dengesiz Teklifin Önlenmesi için Öneriler**  
*Suggestions to Prevent Unbalanced Biding Due to Quantity Error in Retrofit Constructions*  
Suat TOPUZ, Önder Halis BETTEMİR ..... 809-825
24. **Taşkın Tahmininde Farklı Havzaların Kullanılması; Artvin Taşkınlarının İncelenmesi Örneği**  
*Using Different Basins in Flood Forecasting; Example of Artvin Floods*  
Ufuk YÜKSELER, Ömerul Faruk DURSUN ..... 827-835
25. **30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisi Ölçümlerinin Sıkıştırılabilir Algılama Yöntemiyle Analizi**  
*Effect Analysis of the 30 October 2020 İzmir-Samos Tsunami Measurements with Compressive Sensing Method*  
Ali Rıza ALAN, Cihan BAYINDIR ..... 837-845
26. **Yağ Gülü Hasat Durumunun Belirlenmesi için Siyam Sinir Ağları: Yeni Nesil Bir Bitki Tanıma Sistemi**  
*Siamese Neural Networks for Determining Oil Rose Harvest Status: A Next-Generation Plant Recognition System*  
Birkan BÜYÜKARIKAN ..... 847-858
27. **Comparative Analysis of Machine and Deep Learning Methods in Estimating the Turkish Electricity Market Clearing Price**  
*Türkiye Elektrik Piyasası Takas Fiyatının Tahmininde Makine ve Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi*  
Ahmed İhsan ŞİMŞEK ..... 859-867
28. **Farklı Kimyasal ve Isıl Özelliklere Sahip Kömürlerin Doğrusal Programlama ile Harmanlama Optimizasyonu**  
*Blending Optimization of Coals with Different Chemical and Thermal Properties with Linear Programming*  
Sema Nur TURAN, Deniz ADİGÜZEL ..... 869-881
29. **Simultaneously Enhancing the Dynamic Damping and Static Strength Capabilities of Structures: A Case Study Conducted on Fly Ash-based Geopolymer Concrete Specimens using Modal, Mechanical and Microstructural Investigations**  
*Yapıların Dinamik Sönümlenme ve Statik Dayanım Yeteneklerinin Eş Zamanlı Olarak Geliştirilmesi: Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton Numuneler Üzerinde Modal, Mekanik ve Mikroyapısal İncelemeler Kullanılarak Gerçekleştirilen Bir Vaka Çalışması*  
Ferhat ÇEÇEN, Ahmet ÖZBAYRAK, Bekir AKTAŞ ..... 883-901
30. **Hisse Senedi Fiyatlarının LSTM ve ARIMA Modelleri Kullanılarak Tahmin Edilmesi**  
*Forecasting Stock Prices Using LSTM and ARIMA Models*  
Yıldız AYDIN, Gizem VAROL, Eyyüb Ensari GÖKDENİZ, Hakan MANUS..... 903-911

31. **Biosorption of Oxytetracycline with Waste Pine Tree Needles**  
*Atık Çam Ağacı İğneleri ile Oksitetrasiklin'in Biyosorpsiyonu*  
Alper SOLMAZ ..... 913-922
32. **KMSG Tabanlı Şebeke Bağlantılı Rüzgâr Enerji Sisteminin Sensörsüz MGNT ile Kontrolü**  
*Sensorless MPPT Control of Grid-Connected Wind Energy System Based on PMSG*  
Emre AVCI ..... 923-933
33. **Determination of Thermal Properties of Autoclaved Aerated Concrete Wall Sections Constructed with Distinct Mortars by the Experimental and Theoretical Data**  
*Farklı Harçlarla İnşa Edilen Gazbeton Duvar Kesitlerine Ait Isıl Özelliklerin Deneysel ve Teorik Verilerle Belirlenmesi*  
Rukiye KOÇKAR TUĞLA, Orhan Emre ÖRGEL ..... 935-944
34. **Gelişmiş Optik ve Elektriksel Özellikler İçin Pratik ve Rasyonel Bir Strateji: İndirgenmiş Grafen Oksit/ Polikarbazol Bazlı Hibrit Nanokompozit**  
*A Practical and Rational Strategy for Improved Optical and Electrical Properties: Reduced Graphene Oxide/Polycarbazole Based Hybrid Nanocomposite*  
Merve GÜZEL ..... 945-955
35. **COVID Geliştirme Duyarlılığını Tahmin Etmek için Makine Öğrenimi Modellerinin Geliştirilmesi**  
*Development of Machine Learning Models to Predict the Susceptibility of Developing COVID*  
Zeynep ERTEM ..... 957-963
36. **A Modeling Approach for Cargo Transportation Considering Energy Saving**  
*Kargo Taşımacılığında Enerji Tasarrufuna Dayalı Bir Modelleme Yaklaşımı*  
Sevcan EMEK, İsmail TOSUN, Mehmet Emre YILMAZ, Zafer SAY, Yusuf Burak PEKER ..... 965-978
37. **Customer Segmentation by using Annual E-Invoice Data**  
*Yıllık E-Fatura Verilerini Kullanarak Müşteri Segmentasyonu*  
Fahrettin Burak DEMİR, Gürkan ÇELİK ..... 979-991
38. **Cip, Harput, Yeniköy Çevresindeki Elazığ Volkanitlerinin Petrografisi ve Mineral Kimyası**  
*Petrography and Mineral Chemistry of Elazığ Volcanites around Cip, Harput and Yenikoy*  
Sevcan KÜRÜM, Safiye AYDEMİR, İsmail YILDIRIM ..... 993-1007



## Mg Difüzyonu Tekniği ile Türkiye’de Saflaştırılmış Bor Kullanılarak Üretilen MgB<sub>2</sub> için B Saflığının Süperiletkenlik Özellikleri Üzerine Etkisi

Özlem ÇİÇEK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, Hatay, Türkiye  
\*<sup>1</sup> ozlemthecicek@gmail.com

(Geliş/Received: 01/02/2024;

Kabul/Accepted: 04/05/2024)

**Öz:** MgB<sub>2</sub> süperiletken külçeleri, Türkiye’de saflaştırılmış olan üç farklı saflıkta B tozu kullanarak tümüyle aynı koşullarda Mg difüzyon yöntemiyle sentezlendi. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda çoğunlukla yüksek saflıkta başlangıç tozları kullanılmaktadır. Büyük ölçekli üretim için yüksek saflıktaki başlangıç tozları üretim maliyeti açısından büyük bir yük getirmektedir. Bu çalışmamızda Mg difüzyon yöntemi için B düşük saflık derecesinin etkisi incelenmiştir. 850 °C’de 10 saatlik ısıtım sonucu üretilen MgB<sub>2</sub> külçe numunelerinin, mikro yapısal özellikleri XRD analizleri ile incelenmiştir. XRD sonuçları Rietveld yöntemiyle arıtılarak örgü parametreleri  $a=b=3,08 \text{ \AA}$ ,  $c=3,52 \text{ \AA}$  civarında elde edilmiştir. Kristal boyutları ve mikro gerinimleri Scherrer ve Williamson-Hall formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca manyetik özellikleri incelendiğinde, %86,70 saflıkta B kaynağı kullanılan numune de  $T_c$  değeri 38,74 K ve 20 K’de  $J_c(B=0)$  değeri ise  $3,14 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  olarak tespit edilmiştir. Manyetik ölçümlerden  $F_p$  hesaplanmış ve çivilenme mekanizmaları Dew-Hughes’un ölçeklendirme yaklaşımı ile irdelenmiştir. Numunelerimizin tümünde baskın çivilenme mekanizması tane sınırları ve süperiletken olmayan nokta çivilenme mekanizmaları olduğu tespit edilmiştir. İlgili teknolojiler için önemli olan yüksek  $J_c$  ve  $T_c$  değerlerine %86,70 saflıkta Türkiye’de saflaştırılmış olan B kaynağı ile ulaşılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** MgB<sub>2</sub>, B Saflığı, Rietveld Arıtımı, Kritik Akım Yoğunluğu, Çivilenme Mekanizması.

### Effect of B Purity on MgB<sub>2</sub> Superconductor Produced by Mg Diffusion Technique Using Purified Boron in Turkey

**Abstract:** MgB<sub>2</sub> bulks were synthesized by the Mg diffusion method under exactly the same conditions, using B powder of three different purities purified in Turkey. In laboratory scale studies, high purity starting powders are used. For large-scale production, low purity powders are better in terms of production costs. In this study, the effect of low purity grade B on the Mg diffusion method was examined. The microstructural properties of MgB<sub>2</sub> samples produced by heat treatment at 850 °C for 10 hours were examined by XRD analysis. Rietveld refinement was performed on these results, and lattice parameters were obtained around  $a=b=3.08 \text{ \AA}$ ,  $c=3.52 \text{ \AA}$ . Crystal sizes and microstrains were calculated using the Scherrer and Williamson-Hall formulas. In addition, by magnetic measurements, the  $T_c$  was determined to be 38.74 K, and the  $J_c (B = 0)$  at 20 K was determined to be  $3.14 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  for the sample using an 86.70% purity B source.  $F_p$  was calculated, and pinning mechanisms were examined using the Dew-Hughes scaling approach. The dominant pinning mechanism was determined to be grain boundaries and non-superconducting points. It has been shown that high  $J_c$  and  $T_c$  values, which are important for relevant technologies, can be achieved with the 86.70% purity of the B source purified in Turkey.

**Key words:** MgB<sub>2</sub>, B Purity, Rietveld Purification, Critical Current Density, Pinning Mechanism.

#### 1. Giriş

Süperiletken malzemeler, belirli bir kritik sıcaklığın ( $T_c$ ) altına soğutulduklarında elektriksel dirençlerini kaybederler. Heike Kamerlingh Onnes’in 1908’de helyumu sıvılaştırması, bu yeni fazla tanışmamız için zemin hazırlamıştır. Birbiri ardına süperiletkenlik fazı üzerine çalışmalar yapılmış ve günümüzde de yapılmaya devam etmektedir. Günümüze kadar birçok element, alaşım, seramik ve bileşiğin süperiletken özellik sergiledikleri rapor edilerek literatüre kazandırılmıştır. Ancak bu çeşitlilik arasında sınırlı sayıda malzeme uygulama alanları açısından ilgi çekici olabilmıştır. Özellikle tel/şerit uygulamalarından olan miknatıs ve bobin tasarımlarında en çok tercih edilen süperiletkenler Nb<sub>3</sub>Sn, NbTi, BSCCO ve YBCO olmuştur. 2001 yılında Akimitsu tarafından 40 K’de süperiletken faza geçtiği keşfedilen MgB<sub>2</sub>’nin literatüre kazandırılmıştır [1]. Bu yeni süperiletken sahip olduğu özellikler sayesinde araştırmacılar arasında yeni bir heyecan yaratmıştır. MgB<sub>2</sub> süperiletkeninin ilgi çeken özellikleri (i) basit kimyasal yapısı, (ii) nispeten kolay üretimi, (iii) kimyasal maliyetinin düşük olması [2], (iv) polikristal olarak da çalışabilmesi [3], (v) farklı şekil ve boyutlarda üretilebiliyor olması (külçe, silindir, halka, tel, şerit) [4-5], (vi) tane sınırlarının çivilenme merkezi görevi görmesi [6-7], (vii) daha büyük manyetik alanları

\* Sorumlu yazar: [ozlemthecicek@gmail.com](mailto:ozlemthecicek@gmail.com) Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9350-3456

tuzaklayabiliyor olması [8] şeklinde sıralanabilir. Özellikle Manyetik Rezonans Görüntüleme-MRI [9-13], Hatalı Akım Sınırlayıcı-FCL [14-16], Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı SQUID [17], elektrik motoru ve jeneratörler [18-19] gibi uygulamalar için, uygulamanın ihtiyacına yönelik MgB<sub>2</sub> malzeme özelliklerinin geliştirilmesi yönünde birçok araştırma yapılmıştır [20-23]. MgB<sub>2</sub> uzay araştırmalarında, ulaşımda, tıpta, enerjide ve hafif malzeme gerektiren diğer alanlarda hafif bir malzeme oluşu sebebiyle de ilgi çekmektedir. Sağladığı birçok imkân sayesinde ulusal bor ekonomimizin gelişimi açısından da büyük potansiyele sahiptir. Bunun için MgB<sub>2</sub>’nin tel/şerit/kablo formunda üretimine, dolayısıyla da geliştirilmiş elektriksel iletkenlik özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu amaca yönelik MgB<sub>2</sub> üretim teknikleri temelde ikiye ayrılır: (i) *in-situ yöntemi* (Mg ve B toz karışımı önce nihai şekline getirilir, sonra fırınlanır) ve (ii) *ex-situ yöntemi* (önce Mg ve B toz karışımı fırınlanarak MgB<sub>2</sub> oluşturulur, sonra nihai şekle getirilir) [24]. Avantaj olarak tanecikler arası bağlantının daha iyi gelişmesini sağlayan *in-situ* yöntemi ile üretilen numunenin gözenekli yapısı kritik akım yoğunluğunu ( $J_c$ ) düşürdüğü için bir dezavantaj oluşturmaktadır. *Ex-situ* üretimde ise öncekinin tam tersi bir durum söz konusudur [25]. Bu yüzden hangi yöntemin kullanılması gerektiği uygulamaya yönelik karar verilmesi gereken bir durum olarak araştırmacıların karşısına çıkmaktadır. Tanecikler arası bağlanmanın önemli olduğu transport akım içeren uygulamalarda ise genel olarak *in-situ* yöntem ve türevleri tercih edilmektedir. Ancak ihtiyaca yönelik bu yöntemin dezavantajlarını azaltmak önem arz eder. Yapılan çalışmalarda MgB<sub>2</sub>’nin kritik akım yoğunluğunu arttırmak için çeşitli katkılamlar (özellikle karbon katkıları [26-28]), kaçınılmaz ikincil faz olarak MgO’nun uygun seviyede oluşmasının sağlanması [29], MgB<sub>2</sub> tanecik boyutunun küçültülmesi gibi farklı yaklaşımlar denenmiştir [24, 30-32]. Ayrıca, ısıl işlem sonucunda numunede oluşan yapının gözenek yoğunluğunu azaltmak için magnezyum difüzyonu ve türevi yöntemler önerilmiş ve oldukça büyük külçe numuneler üretilmiştir [33]. Mg difüzyon yöntemi ve türevleri MgB<sub>2</sub>’nin tel formu için de popüler kullanılan bir yöntem olmuştur [34-36]. Hatta MgB<sub>2</sub> tel/şerit/kabloların birbirine eklenmesi gereken ek yerlerinde, bu ekleme işlemi için de yaygın olarak kullanılan *in-situ* yöntem yerine Mg difüzyon yöntemi [37-38] tercih edilmeye başlanmıştır. Bunlara ilaveten Mg ve B başlangıç tozlarının parçacık boyutlarının etkileri de incelenmiştir [39]. Başlangıç tozlarının reaksiyon yüzeyini artırma amaçlı yüksek enerjili bilyeli öğütme ile birbirine yakın ve küçük parçacık boyutları elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun sonucunda da kritik akım yoğunluğunda artış rapor edilmiştir [31, 40-42]. Başlangıç tozlarının saflıklarının önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir [43]. Bu çalışmalarda genellikle % 99 civarı yüksek saflıkta küçük parçacık boyutuna sahip amorf B tozu kullanılarak yüksek kritik akım yoğunluğu elde edilmiştir [44]. Laboratuvar çalışmaları literatüre katkı sağlamak amacıyla numunelerin özelliklerini araştırmak için küçük miktarlarda üretim yeterli olduğundan, yüksek saflıkta başlangıç tozlarının kullanımı kabul edilebilir. Süperiletken teknoloji geliştikçe günlük yaşamımızda yer bulacak uygulamalar yaygınlaşacağından, büyük ölçekli üretim ihtiyacı da artacaktır. Büyük ölçekli süperiletken üretimi için ise yüksek miktarlarda başlangıç tozuna ihtiyaç duyulur. Bu yüzden yüksek saflıkta başlangıç tozlarının kullanımı, üretim maliyeti açısından sorun oluşturur. Bu noktada düşük saflıkta başlangıç tozlarının kullanımı bu maliyeti ciddi oranda azaltabilir.

Bu çalışmada temelde üretim maliyetinin önemli bir kısmını oluşturan başlangıç kimyasallarının maliyetini azaltabilmek için Türkiye’de saflaştırılmış Bor kaynaklarının farklı saflık derecelerinin bazı süperiletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. MgB<sub>2</sub> süperiletken örnekleri, *in-situ* yöntemin dezavantajı olan gözenekli yapı sorununa çözüm olarak Mg difüzyon yöntemi ile üretildi. Üretilen MgB<sub>2</sub> örneklerinin bazı mikro yapısal ve manyetik özellikleri incelenerek bulgular değerlendirildi.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada incelenen numuneler aynı kimyasal oranlarda (Mg:B=2:1), aynı Mg tozu (%99,50) ile farklı saflıklarda (PAVEZYUM, PVZ %95,20, PVZ %91,10 ve PVZ %86,70) B tozları kullanılarak üretildi. B öncül tozlarının ortalama parçacık büyüklüğü  $\leq 1 \mu\text{m}$  ve Mg öncül tozunun ortalama parçacık büyüklüğü  $\leq 44 \mu\text{m}$  (-325 mesh)'dir. Mg difüzyon yöntemi uygulaması için B pelet formda ve Mg ise toz formda kullanıldı. B tozları 5MPa basınç altında 5 mm çaplı pelet formuna getirildi. B pelet yüksekliği kullanılan toz miktarı için yaklaşık 1,5 mm civarında elde edildi. Tüm numuneler ısıl işleme alınmadan önce farklı saflıktaki her bir B peleti kimyasal orana uygun miktarda Mg tozu ile Zr folyo ile sarıldı. Hem B peleti ile Mg tozlarını yakın temas halinde tutmak hem de kullanılan tüp ile kimyasallarımızın temasını kesen bir bariyer olması amacıyla Zr folyo kullanıldı. Zr folyo ile sarılmış formdaki kimyasallar Ni-Fe tüplere konuldu ve tüplerin uçları preslenerek kapatıldı. Isıl işlem aşamasında örnekler 5°/dak ısıtma hızı ile 850°C’de 10 saat Argon gazı akışı altında bekletildikten sonra fırın içinde soğumaya bırakılarak üretildi. Bu çalışmada bundan sonraki kısımda kolaylık sağlaması için hazırlanan numuneler B saflık derecelerine atfen PVZ %95,20 B kullanılan numune A(95), PVZ %91,10 B kullanılan numune B(91) ve PVZ %86,70 B kullanılan numune C(86) olarak adlandırılmışlardır.

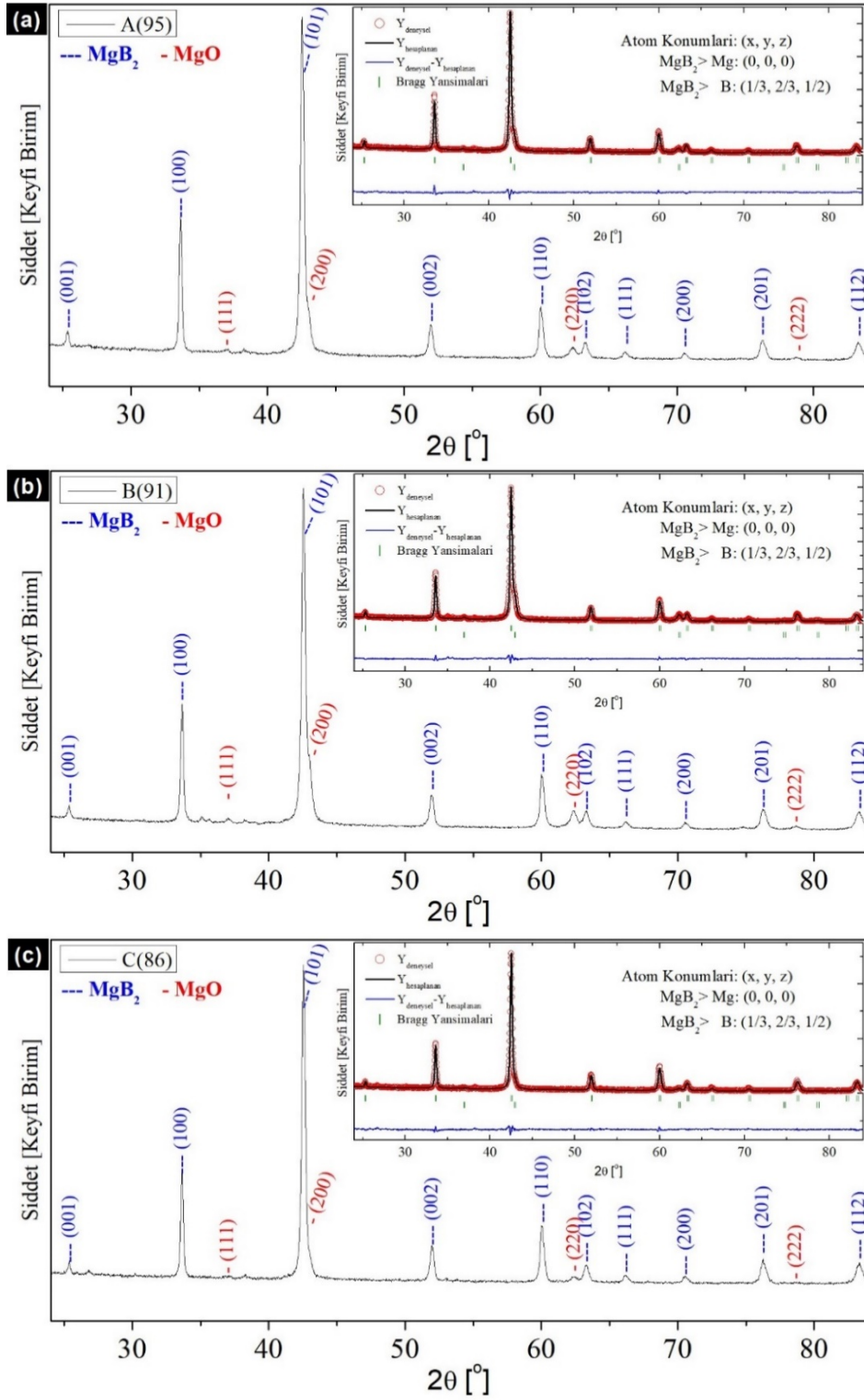
Kristalli maddelerin incelenmesi ve fazların araştırılması için X-ışını difraktometresi (XRD) standart bir araçtır. Bu yüzden fırınlama işlemi tamamlanan numunelerin faz analizi, CuK $\alpha$  radyasyonu kullanan GBC

Scientific - MMA(mini-materials analyzer) X-ışını difraktometresi (XRD) ile yapıldı. Bu ölçümler pelet formundaki numunelerin yüzeylerinden  $24^\circ$  ile  $84^\circ$  arasında  $0,02^\circ$  adımlarla oda sıcaklığında alındı. XRD sonuçları Match ve Tracer yazılımı kullanılarak analiz edilerek iki fazlı yapıya sahip oldukları tespit edildi. Daha sonra XRD sonuçları Rietveld yöntemi ile FullProf yazılımı kullanılarak iki fazlı olarak artırılarak örgü parametreleri, birim hücre hacimleri ve faz oranları belirlendi. Numunelerin kristal boyutu Scherrer formülü ve mikro gerinim değeri Williamson-Hall (WH) Denklemi kullanılarak XRD verilerinden hesaplandı. Ayrıca numunelerin uygulanan sabit manyetik alan altında sıcaklığa bağlı manyetik moment  $M(T)$  ölçümleri ve sabit sıcaklık altında uygulanan değişken manyetik alana bağlı manyetik moment  $M(H)$  ölçümleri fiziksel özellikler ölçüm sistemi (PPMS) Quantum Design PPMS-9T sisteminde gerçekleştirildi.  $M(T)$  verilerine göre bu örneklerin kritik sıcaklıkları normal durumdan ilk sapma noktasından tespit edildi. 5 K ve 20 K'de 8 T'ye kadar uygulanan değişken manyetik alan altında gerçekleştirilen  $M(H)$  ölçümlerinden Bean Modeli kullanılarak manyetik kritik akım yoğunlukları ( $J_{c,mag}$ , A/cm<sup>2</sup> cinsinden) hesaplandı. Akı çivilenme mekanizmasını incelemek için akı çivilenme kuvveti  $F_P = J_c \times B$  formülü ile hesaplandı. Çivilenme mekanizmalarının analizi, Dew-Hughes'un (DH) ölçeklendirme yaklaşımı ve Gajda'nın DH yönteminden geliştirerek oluşturduğu yaklaşım [45] kullanılarak yapıldı.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Isıl işlemi tamamlanan numunelerin yüzeyinden  $24^\circ$  ile  $84^\circ$  arasında  $0,02^\circ$  adımlarla oda sıcaklığında taranarak elde edilen XRD grafikleri Şekil 1'de verildi. Şekil 1'den de görüldüğü gibi iyi gelişmiş MgB<sub>2</sub> fazının oluştuğu gözlemlendi. Tüm numunelerde MgB<sub>2</sub> ana pikinin yanında omuz vermiş şekilde gözlenen MgO'nun  $2\theta \approx 42,80^\circ$ 'de (200) yansımasına ait ana piki ve  $2\theta \approx 63^\circ$ 'de (220) yansımasına ait olan piki tüm numunelerde net olarak gözlemlendi. Elde edilen XRD sonuçları, bu çalışma için üretilen MgB<sub>2</sub> malzemesinin tam olarak saf olmadığını ve MgO safsızlık fazını belli oranlarda içerdiğini açıkça gösterdi. MgO'nun yüksek reaksiyona girme meylinde dolayı bu piklerin ortaya çıkması beklenen bir durumdur [46-47]. Düşük saflıkta B ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda da MgB<sub>2</sub> ve MgO fazları elde edilmiş olup, Mg:B=1:2 kimyasal oranına sadık olarak hazırlanan numunelerde MgB<sub>2</sub> ve MgO fazlarına ek olarak çok küçük oranlarda MgB<sub>4</sub> ve MgB<sub>12</sub> fazları raporlanırken [48], fazla Mg kullanılmış olan çalışmada MgB<sub>2</sub> ve MgO fazlarına ek olarak Mg fazı da gözlemlendiği rapor edilmiştir [49]. Savaskan ve grubunun bu çalışmasında [49] ortalama parçacık büyüklüğü  $\leq 1 \mu\text{m}$  olan %86-88, %91-93 ve %85-97 saflıklarda amorf B kaynakları ile hazırladıkları numunelerden elde edilmiş olan XRD desenleri ile bu çalışmada elde edilmiş olanlar karşılaştırıldığında, faz yapısı açısından benzerlik sergilediği tespit edilmiştir. Literatürdeki bu farklı saflıklardaki B tozları ile yapılan çalışmalarda numunelerden elde edilen XRD desenlerinde az önce bahsedilen fazlar dışında belirgin bir başka faz rapor edilmemiştir. Bu çalışmada Mg uçuculuğu için fazla Mg kullanımı yerine, numune tüp içinde kapatıldı. Bu işlemde numunenin kapatıldığı hacmin numune hacmine yakın olmasına dikkat edildi. Böylece Mg uçuculuğunun önüne geçilmeye çalışıldı. Bunun sonucu olarak yukarıda verilmiş olan [48] ve [49] çalışmalarından farklı olarak artakalan Mg piki veya Mg eksikliğinden oluşan MgB<sub>4</sub> ve MgB<sub>12</sub> piki gözlemlenmedi.

XRD desenleri ile iki fazlı Rietveld arıtımı gerçekleştirilerek fazlara ait yansımalar, bu yansımaların şiddetleri, MgO'nun oranını ve MgB<sub>2</sub> fazının kafes parametreleri hesaplandı. Bunun için öncelikle programa numune fazlarının tanıtılması yapıldı. Numunelerin fazları, ana faz MgB<sub>2</sub> ve ikincil faz MgO olarak belirlendikten sonra arıtım programı için gerekli olan faz yapılarına ait temel değerler arıtım için referans değerler olarak programa tanımlandı. Yansımalara ait pik şeklini tanımlamak için de FullProf yazılımında Pseudo-Voigt fonksiyonu tercih edildi [50]. Programda arıtım işlemi için ilk olarak arka plan (background) eşleştirmesi yapıldı. Devamında sırası ile ilgili parametreler arıtıma tabi tutularak, orijinal ölçüm ile arıtım sonuçları arasındaki farkı gösteren  $\chi^2$  değeri minimize edildi. Şekil 1'deki iç grafiklerde arıtım sonuçları gösterildi. Bu grafiklerde kırmızı daireler ile orijinal ölçüm, siyah çizgi ile hesaplanan model sonuçları ve mavi çizgiyle ölçüm ile model arasındaki fark gösterildi. Ayrıca bu iç grafiklerde modele göre fazlara ait Bragg yansımalarının yerleri yeşil çubuklar ile üst sırada MgB<sub>2</sub> ve alt sırada MgO için verildi. Literatürdeki çalışmalarda saf MgB<sub>2</sub> numuneleri için  $a$  örgü parametresi 3,07-3,09 Å aralığında ve  $c$  örgü parametresi 3,52-3,55 aralığında rapor edilmiştir [51-55]. Arıtım sonucunda elde edilmiş olan MgB<sub>2</sub> örgü parametreleri literatürde rapor edilen değer aralığında olup,  $a=b=3,08$  Å,  $c=3,52$  Å civarında elde edildi. Numunelere ait bu parametreler ayrı ayrı arıtım sonuç dosyalarında hesaplanmış olduğu halleriyle ile Tablo 1'de verildi.  $a$  örgü parametresi neredeyse sabit kalırken  $c$  parametresinde de ciddi bir değişim gözlemlenmedi.



Şekil 1. Arıtım sonucunda a) A(95), b) B(91) ve c) C(86) örnekleri için elde edilmiş XRD desenleri ve iç grafiklerde Reitveld arıtımı sonuçları verilmiştir.

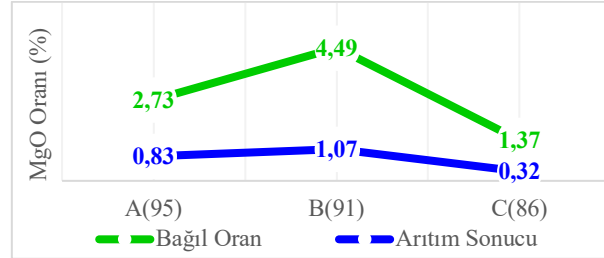
**Tablo 1.** Numunelere ait örgü parametreleri,  $T_c$  ve  $J_c$  ( $0 T, 20 K$ ) değerleri

Numune Adı	$a = b$ [Å]	$c$ [Å]	MgO oranı	$T_c$ [K]	$J_c$ ( $0 T, 20 K$ ) [A/cm <sup>2</sup> ]
A(95)	3,0824	3,5218	0,83	38,22	$2,30 \times 10^5$
B(91)	3,0822	3,5229	1,07	38,47	$2,40 \times 10^5$
C(86)	3,0823	3,5210	0,32	38,74	$3,10 \times 10^5$

Ayrıca, iki fazlı Reitveld arıtımı yapıldığı için bu iki fazın oranları da elde edilmiş oldu. Arıtım sonucunda elde edilmiş olan MgO faz oranları ile B'nin saflık derecesi arasında bir bağlantı olmadığı gözlemlendi. Kontrol amaçlı olarak MgO oranı Denklem 1 [56] kullanılarak arıtım sonucunda elde edilen MgO ve MgB<sub>2</sub>'ye ait pik şiddetlerinden hesaplanmıştır.

$$D_{MgO}(\%) = \frac{I_{MgO(220)}}{\sum I_{MgB_2(hkl)} + I_{MgO(220)}} \times 100 \quad (1)$$

burada  $I$  ilgili XRD piklerinin şiddeti ve  $(hkl)$  Miller indisleridir. MgO oranları için Denklem 1'e göre her bir numune için hesaplanan bağıl oran sonuçları ile Reitveld arıtımı sonucunda elde edilen arıtım sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 2'de verildi ve paralel bir eğilim gösterdikleri görüldü. Numunelerde, Denklem 1 ile elde edilen MgO oranı maksimum % 4,50 ile sınırlı kaldı. Literatürde rapor edilen MgO fazının oranları incelendiğinde, Qin ve arkadaşları %93-94 saflıkta amorf B ile hazırlanan saf MgB<sub>2</sub> numunesinde % 6,30 civarında olduğunu bildirmişlerdir [57]. Numune hazırlama aşamasında kontrollü Ar atmosferinin etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada %95-97 saflıkta B kullanılarak biri normal atmosferde diğeri kontrollü Ar atmosferinde hazırlanan numuneler için sırasıyla %39,63 ve %7,23 olarak rapor edilmiştir [58]. MgB<sub>2</sub> üretiminde kaçınılmayan MgO oluşumunu azaltmak amacıyla Cu ilavesi kullanan Ma ve ekibi ise saf MgB<sub>2</sub> numunesinde %16,50 oranında MgO fazı rapor etmiştir [29]. MgO fazının oluşmasının MgB<sub>2</sub>'nin süperiletken özellikleri açısından MgB<sub>2</sub> tane sınırlarında birikmesi sonucu kritik akım yoğunluğunu düşürebileceği genel kabul görmüştür. Buna karşın, Jiang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada MgB<sub>2</sub>'nin uyum uzunluğu (yaklaşık 6-7 nm) mertebesinde parça boyutuna sahip MgO katkısı denemişlerdir. Bu çalışmada düşük oranlarda (ağırlıkça %2,5'ten az) yapılan MgO katkısının kritik akım yoğunluğunu ( $J_c$ ) artırabildiği rapor edilmiştir [59]. Bu açıdan, üretilmiş olan numunelerimizde MgO oranlarının çok düşük olması nedeniyle ve ayrıca minimal düzeydeki MgO'nun akı çivilenme merkezi olarak davranma olasılığı bulunduğu için süperiletkenlik özellikleri açısından önemli bir olumsuzluk ve fark oluşturmayacağı düşünülmüştür.



**Şekil 2.** MgO oranları için bağıl oranları ve arıtım sonuçları

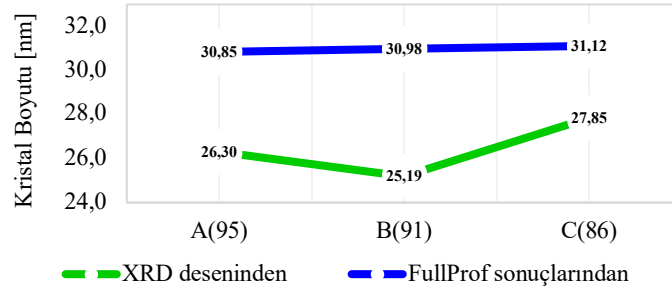
Piklerin şekilleri, kristalografik yapının düzgünlüğünü belirleyen bir diğer önemli göstergedir. XRD modellerini oluşturan pik profiline, kristal boyutu, mikro gerinim, sıcaklık ve enstrümantal katkılar (enstrümantal tepe genişliği katkısı X-ışını kaynağına, dedektöre, birincil ve ikincil optiklere vb. bağlıdır [60]) gibi çeşitli katkılar vardır. Bu bağlamda Denklem 2'deki Scherrer denklemi [61] kullanılarak, XRD piklerinin genişlikleri ve numunenin kristal boyutuyla ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Scherrer denklemi;

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

şekindedir. Burada  $D$  kristal boyutu (nm cinsinden),  $K$  Scherrer-sabitidir (0,94).  $\lambda$  Cu  $K_\alpha$  radyasyonunun dalga boyu (nm cinsinden),  $\beta$  pikin yarı yüksekliğindeki tam genişliği (FWHM) (radyan cinsinden) ve  $\theta$  (radyan cinsinden) pikin konumudur. Numune için ortalama kristal boyutu, XRD deseninde (100), (101), (002), (110), (102), (201) ve (112) yansımalarına ait MgB<sub>2</sub> pikleri için gerekli değerler kullanılarak hesaplandı. Scherrer denklemi ile her bir pik için hesaplanan kristal boyutlarının ortalaması alınarak numune geneli için ortalama boyut belirlendi. Burada Scherrer denklemi ile ortalama kristal boyutları hesaplanırken XRD desenindeki ilgili piklerin



FWHM ve  $\theta$  değerleri tespit edilerek hesaplandı. Bu sonuçlar Şekil 3’te yeşil renkli eğri ile verilmiştir. Şekil 3’ten görülebileceği gibi XRD verilerinden elde edilen ortalama kristal boyutları arasında küçük farklar gözlenmiştir. XRD deseninde elde edilen piklerin bazılarında hem MgB<sub>2</sub> hem de MgO yansımalarının katkısı olabilmektedir, örneğin MgB<sub>2</sub>’nin ana pikinin MgO’nun ana piki ile kısmen çakışıyor olması. Bu durum, MgB<sub>2</sub> fazının kristal boyutu hesaplanırken kullanılan MgB<sub>2</sub> piklerine ait FWHM değerini MgO fazının etkilediği düşündürdü. MgB<sub>2</sub> kristal yapılarını boyutlarını hesaplarırken MgO etkisinin kaldırılmasının daha doğru sonuçlar vereceğine karar verildi. Rietveld yöntemiyle arıtım sonuçlarında hesaplanmış olan MgB<sub>2</sub>’ye ait FWHM ve  $\theta$  değerleri kullanılarak Scherrer denklemi uygulaması yapıldı. Arıtım verileri ile hesaplanan ortalama kristal boyutları Şekil 3’te mavi renkli eğri ile verilmiştir. Arıtılmış değerlerle hesaplanan ortalama kristal boyutları arasında neredeyse hiç fark gözlenmedi. Arıtılmış değerlerle hesaplanan ortalama kristal boyutlarında MgO etkisi kaldırıldığı için üretilen numunelerimizin neredeyse aynı büyüklükte kristal boyutları sergiledikleri söylenebilir. Ayrıca hem örgü parametrelerinin neredeyse sabit kalmış olması hem de kristal boyutlarının çok yakın değerlerde tespit edilmiş olması, küçük oranlarda varlığı gözlenmiş olan MgO fazının tane sınırlarında birikmiş olabileceğini düşündürdü. Ancak bu konuda kesin karar verilebilmesi için SEM ve EDX analizleri ile bu noktanın detaylı araştırılmasına ihtiyaç vardır.



Şekil 3. Scherrer Denklemi ile elde edilen kristal boyutları

Kristal yapılarıdaki mikro gerilme Denklem 3’te verilen Williamson-Hall Denklemi [62] yardımı ile hesaplanabilmektedir;

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta \quad (3)$$

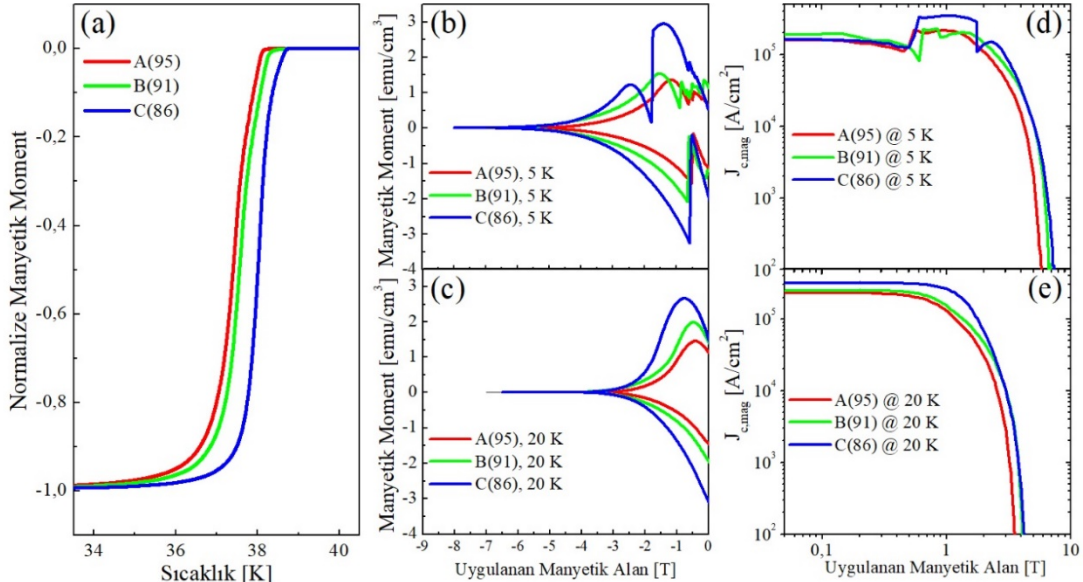
Burada  $\beta$  piklerin FWHM değeri (radyan cinsinden)  $\theta$  Bragg açısı (radyan cinsinden),  $K$  boyutsuz Scherrer sabiti (0,94),  $\lambda$  kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu (nm cinsinden),  $D$  kristal boyutu (nm cinsinden) ve  $\epsilon$  örgü gerinimidir [50]. Denklem 3’teki  $(4\sin\theta)$  terimi  $x$ - eksenine ve  $(\beta \cdot \cos\theta)$  terimi  $y$ - eksenine yerleştirerek grafik çizildiğinde, elde edilen noktaları kullanarak en iyi uyum doğrusu elde edilir. Denklem 3’e göre bu doğrunun eğimi mikro gerinim değerini verirken,  $y$ - eksenini kestiği nokta ise numunedeki kristallerin ortalama büyüklüğü hakkında bilgi verir. Denklem 3’ü kullanılarak arıtım verilerinden A(95) için mikro gerinim değeri  $1,50 \times 10^{-3}$ , B(91) için mikro gerinim değeri  $1,30 \times 10^{-3}$  ve C(86) için mikro gerinim değeri  $1,40 \times 10^{-3}$  olarak hesaplandı. Literatürde bilyeli öğütmenin MgB<sub>2</sub> üzerindeki etkinin araştırıldığı çalışma da [63] bilyeli öğütme yapılmamış örnekte örgü gerinim değeri  $2,50 \times 10^{-3}$  olarak rapor edilmiştir. Bu çalışmada uygulanan bilyeli öğütme süresi artışı ile gerinim değeri  $4,50 \times 10^{-3}$ ’e kadar yükselmiştir. Kim ve ekibinin yaptığı çalışmada [64] ise WH grafikleri ile elde edilen gerinim değerleri 800 °C ısıl işlem için  $4,00 \times 10^{-3}$  civarındayken 900°C ısıl işlem için  $3,50 \times 10^{-3}$  civarında rapor edilmiştir. Bu çalışmada bulmuş olduğumuz gerinim değerleri literatüre kıyasla daha düşük ve tüm numuneler için neredeyse sabit olarak hesaplandı. Sonuç olarak düşük oranda MgO varlığının MgB<sub>2</sub> yapısının mikro gerilimini etkilemediği görüldü. Bu durum yine düşük orandaki MgO fazının tane içinde değil de tane sınırlarında biriktiği şeklinde yorumlandı. Genel olarak düşünüldüğünde mikro gerinim, yapı kusurlarının derecesine atfedilir [65]. Bu yapı kusurları yük taşıyıcılarının saçılmalarını artırır. Bu yüzden ortalama serbest yol azalır. Bu durum direncin ve B<sub>c2</sub>’nin artmasına neden olur [66]. Buna göre numunelerin mikro gerinim değerlerinin birbirine çok yakın oluşu, numuneler arasında yapı kusurları açısından da önemli bir fark olmadığı şeklinde yorumlandı. Daha önce de vurgulandığı gibi bu çıkarımların SEM ve EDX analizleri ile detaylı olarak araştırılması gerekir. XRD deseninde pik kayması gözlenmediği için makro gerinim de söz konusu değildir [67].

Numunelerin manyetik özellikleri, uygulanan sabit manyetik alan altında sıcaklığa bağlı manyetik moment,  $M(T)$ , ölçümü ve sabit sıcaklıklarda uygulanan değişken manyetik alana bağlı manyetik moment,  $M(H)$ , ölçümleri ile incelendi. Kritik sıcaklık ( $T_c$ ), Şekil 4 (a)’da verilen PPMS-9T (Quantum Design) kullanılarak yapılmış olan

$M(T)$  ölçüm sonuçlarından belirlendi.  $M(T)$  verilerine göre bu örneklerin kritik sıcaklıkları  $T_{c,A}= 38,22$  K,  $T_{c,B}= 38,47$  K,  $T_{c,C}= 38,74$  K olarak manyetik moment eğrilerinin normal durumdan ilk saptığı sıcaklıklardan tespit edildi. Şekil 4 (a)'dan görüldüğü gibi başlangıç tozu olarak kullanılan B'ların saflık derecesinin azalmasına karşılık artan bir eğilim gösterdi. Numunelerin geçiş bölgelerindeki eğri parçaları incelendiğinde A(95) ve B(91) numuneleri arasında neredeyse hiç fark yoktur. Sadece farklı  $T_c$  değerleri yüzünden kaymış bir görünümde dirler. Buna karşın C(86) numunesinde ise kısmen daha dar bir geçiş gözlemlendi.  $T_c$  değeri en yüksek olan bu numunede faz geçişinin de diğer numunelere göre daha dar gerçekleşmiş olması, bu numunenin diğerlerine göre süperiletkenlik özelliklerinin kısmen daha iyi olduğunu göstermektedir. Kendi aralarında bu farklara rağmen tüm numunelerin faz geçişi keskin olarak gerçekleşmiş olması numunelerin iyi derecede homojenlik sergilediklerine işaret etmiştir. Numunelerin manyetik kritik akım yoğunluğunun ( $J_{c,mag}$ ) manyetik alan bağımlılığı genişletilmiş Bean modeline göre Denklem 4 kullanılarak mıknatıslanma döngülerinden hesaplanmıştır [68].

$$J_c = \frac{20 \cdot \Delta M}{\left(a - \frac{a^2}{3b}\right)} \quad (4)$$

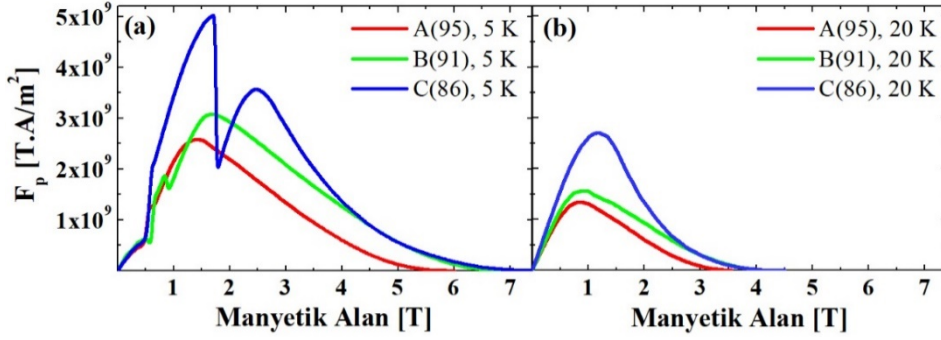
burada  $\Delta M = M^+ - M^-$  (emu/cm<sup>3</sup> cinsinden) mıknatıslanma döngüsünün genişliğidir,  $a$  ve  $b$  ( $a < b$ , cm cinsinden) numunenin uygulanan manyetik alana dik kesit alan boyutlarıdır. 5 K ve 20 K'de gerçekleştirilmiş olan  $M(H)$  ölçümleri 5 K için Şekil 4 (b)'de ve 20 K için Şekil 4 (c)'de verildi.  $M(H)$  eğrilerinin genişliğinden genişletilmiş Bean modeline göre hesaplanan  $J_{c,mag}(H)$  eğrileri ise 5 K için Şekil 4 (d)'de ve 20 K için Şekil 4 (e)'de sunuldu. Sentezlenen tüm numunelerde 5 K'de gerçekleştirilen hesaplamalarda düşük manyetik alan bölgesinde gözlenen keskin değişimler manyetik akı sıçramasından kaynaklanmaktadır. Bu durum yüksek  $J_c$  ve düşük ısı kapasitesi ile manyetik akının lokalize hareketine neden olması sonucunda süperiletken malzemede akı sıçramalarına sebep olmasından kaynaklanır [69]. Bu akı sıçramaları sadece 5 K ölçüm sonuçlarında gözlemlendi ve A(95) ve B(91) numunelerinde 0-1 Tesla aralığında gözlenirken, C(86) numunesinde 2 Tesla civarına kadar gözlemlendi. Hesaplanan kritik akım yoğunluğu değerleri literatür ile kıyaslanabilir boyutta bulunmuştur. Örneğin, Dadiel ve arkadaşlarının 2023'te yayınladıkları çalışma sonuçlarında *ex-situ* ve *in-situ* karma bir teknik ile üretilen numunelerinde dış manyetik alan sıfır iken 20 K'de  $3,48 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> ve sadece *in-situ* teknik ile üretilen numunelerinde ise  $2,98 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> olarak rapor edilmiştir [70]. Bu çalışmada üretilmiş olan numunelerimizde ise 5 K'de  $2,22 - 3,44 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> aralığında ve 20 K'de  $2,34 - 3,14 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> aralığında kritik akım yoğunluklarıyla literatür değerleri ile kıyaslanabilir. C(86) numunesi hem 5 K'de hem de 20 K'de genel olarak diğer iki numuneye göre iyi sonuçlar vermiştir. Yine de bölgesel olarak 5 K'de 4,00-5,50 T aralığında ve 20 K'de 2,50-3,50 T aralığında B(91) numunesi ile aynı ve hatta kısmen daha küçük değerler gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. (a)  $M(T)$  ölçüm sonuçları, (b)  $M(H)$  ölçümlerinden 5K için hesaplanan  $J_{c,mag}$ , (c) 20K için hesaplanan  $J_{c,mag}$ , (d) 5K de  $F_p$  grafikleri ve (e) 20K de  $F_p$  grafikleri

Numunelerin kristal boyutu ve mikro gerinim değerlerinde önemli bir fark olmadığı için C(86) numunesinin nispeten iyi  $J_c$  değerleri sergilemiş olması, öncül B tozunun safsızlıklarının numunede homojen olarak dağılarak

normal nokta akı çivilenme merkezi olarak davranması olarak yorumlandı. Bu sonucu araştırmak için akı çivilenme mekanizmalarının detaylandırılmasına karar verildi. Akı çivilenme mekanizmasını detaylandırabilmek için öncelikle akı çivilenme kuvveti ( $F_p$ ),  $F_p = J_c \times B$  formülü [71] kullanılarak  $J_c$  değerlerinden elde edildi. Akı çivilenme kuvveti ( $F_p$ ) eğrileri 5 K için Şekil 5 (a)’da ve 20 K için Şekil 5 (b)’de verildi. Düşük manyetik alan bölgesinde C(86) numunesi için elde edilen  $F_p$  değerleri belirgin bir fark gösterirken A(95) ve B(91) numuneleri arasında bu derece bir fark gözlenmedi.  $F_{p,max}$  değerine ulaştıktan sonra yüksek alanlara doğru A(95) ve B(91) numuneleri benzer bir karakteristik sergilerken, C(86) eğrisinin yapısı belirgin şekilde farklılık gösterdi.  $F_p$  pikinin düşük alanlarda ortaya çıkması,  $j_c(B)$ ’deki yüksek alanlara çıkıldıkça güçlü düşüş göstermesine bağlıdır.



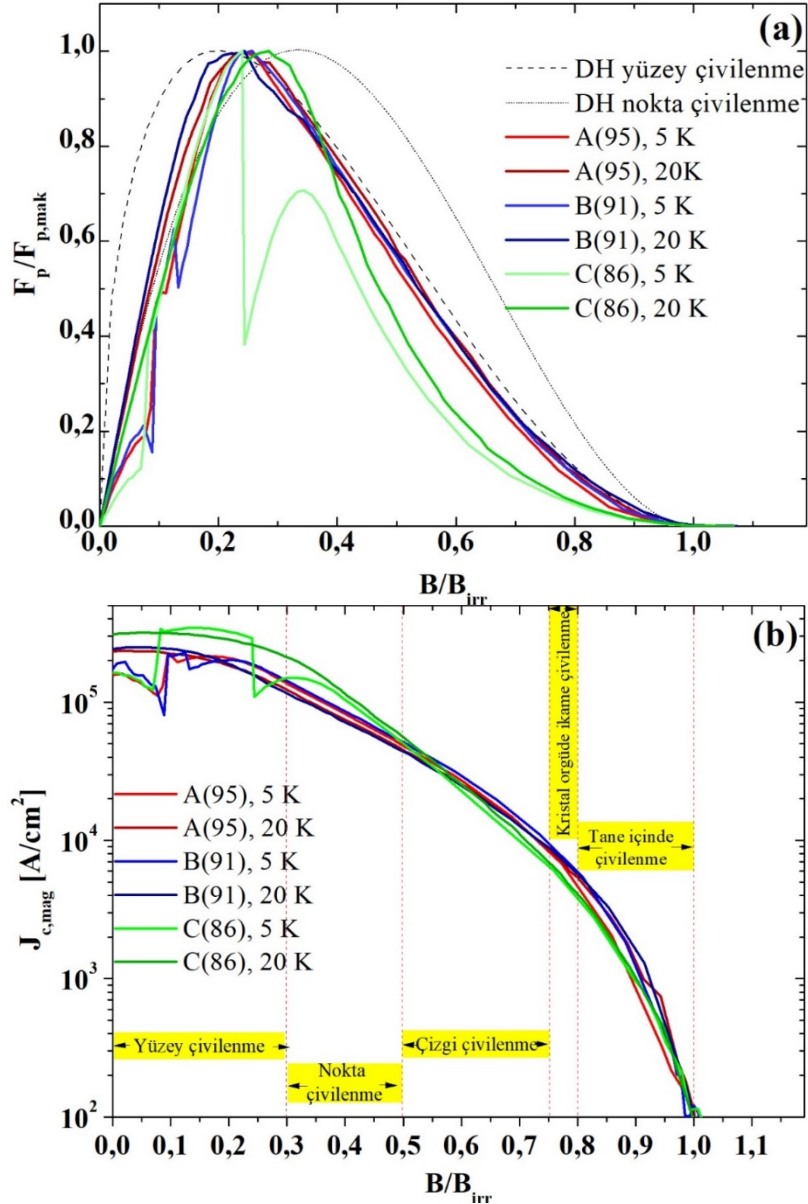
Şekil 5. Çivilenme kuvveti eğrileri (a) 5 K’de ve (b) 20 K’de

Numunelerdeki akı çivilenme mekanizmalarını kıyaslanabilmesi için Dew-Hughes’un (DH) ölçeklendirme yaklaşımını [72] kullanıldı. Bu yaklaşıma göre ölçeklendirilmiş sabitleme kuvveti verileri  $f = F_p/F_{p,max}$  ve  $b = B/B_{irr}$ ,  $f = A.(b)^p.(1 - b)^q$  ile verilen fonksiyonel bağımlılığa uyarlanabilir. Bu bağıntıda A sayısal bir parametredir ve p ve q gerçek sabitleme mekanizmasını açıklar. DH ölçeklendirmesine göre  $B/B_{irr}$  ekseninin belli gölgelerinde belli mekanizmalar baskındır ve  $f$ ’ın  $b$ ’e göre oluşturulan eğrilerinde özlenen pikin bulunduğu bölge geçerli baskın mekanizmayı gösterir [72]. Örneğin, 5 nm boyutlarında (MgB<sub>2</sub>’nin uyum uzunluğu) çökeltiler (MgO, Mg, MgB<sub>4</sub> vb.) ve boşluklar gibi süperiletken olmayan noktalarda girdap çekirdeğinin çivilenmesinden kaynaklanan nokta çivilenme mekanizması  $f = A.b^1.(1 - b)^2$  DH denklemi ile ifade edilir ve  $F_p/F_{p,max} - B/B_{irr}$  grafiğinde  $b=0,33$  de pik oluşur. Tane sınırları gibi yüzey çivilenme merkezlerinde girdap çekirdeğinin çivilenmesinden kaynaklanan yüzey çivilenme mekanizması  $f = A.b^{0,5}.(1 - b)^2$  DH denklemi ile ifade edilir ve  $F_p/F_{p,max} - B/B_{irr}$  grafiğinde  $b=0,20$  de pik oluşur [73]. Bu çalışmadaki numunelere ait  $F_p/F_{p,max}$ ’ın  $B/B_{irr}$ ’e göre grafikleri ile bu iki Dew-Hughes fonksiyonu, birlikte Şekil 6 (a)’da verildi. 5 K de gerçekleştirilen ölçümlerde akı sıçramaları mevcut olduğu için  $F_{p,max}$  tespitinde sıkıntı yaşanmış ancak sayısal olarak en yüksek olan değer  $F_{p,max}$  kabul edilerek devam edildi. Bu yüzden 5 K de  $F_p/F_{p,max}$  eğrilerinin tepe noktaları aynı konumda (yaklaşık olarak  $B/B_{irr}=0,24$ ’te) gözlemlendi. Buna karşın 20 K ölçümlerinde  $F_p/F_{p,max}$  eğrilerinin tepe noktaları A(95) numunesi için  $B/B_{irr}=0,24$ ’te, B(91) numunesi için  $B/B_{irr}=0,23$ ’te ve C(86) numunesi için  $B/B_{irr}=0,27$ ’de konumlanmış olarak tespit edildi. Bu durumda DH yaklaşımına göre tüm numunelerimizde genel olarak hem tane sınırlarındaki yüzey çivilenmesi etkisi hem de normal nokta (boyutu 5nm civarında) çivilenme etkisi olduğunu gösterdi. 20 K ölçümlerini temel alındığında A(95) ve B(91) numuneleri için tepe konumlarının çok yakın olması, bu iki numunede yüzey ve nokta çivilenme merkezleri oranının yakın olduğu yönünde yorumlandı. Ayrıca her iki numunede de tepe noktasının 0,20 değerini daha yakın oluşu sebebiyle de, yüzey çivilenme mekanizmasının nokta çivilenme mekanizmasına göre kısmen daha baskın olduğunu sonucuna varıldı. Buna karşın C(86) numunesindeki durumun nokta çivilenme mekanizmasına doğru kaydığını gözlemlendi. Bu kayma nedeniyle, C(86) numunesinde çivilenme merkezi görevi gören süperiletken olmayan noktaların diğer 2 numuneye göre daha fazla olduğu düşünüldü. Ayrıca  $B/B_{irr}=0,27$ ’de gözlemlenen tepe noktası, çivilenme merkezi olan bu noktaların boyutlarının MgB<sub>2</sub>’nin uyum uzunluğuna (5nm) yakın değerlerde olması gerekliliği sonucunu doğurdu. Geldiğimiz bu noktada DH yaklaşımından elde ettiğimiz bu çıkarımın desteklenebilmesi için SEM ve EDX gibi analizler ile numunelerin daha detaylı araştırılması gerekmektedir.

DH yaklaşımı için  $F_{p,max}$  değeri gereklidir ve bu çalışmada 5 K ölçümlerinde gözlenen akı sıçramaları yüzünden bu değer tespitinde zorlanılmıştır. Ayrıca yüksek manyetik alan altında C(86) numunesinde diğer ikisinden farklı bir eğilimi olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden Gajda’nın [45] referanslı çalışmasında önerdiği yöntem ile inceleme gerekli görülmüştür. Gajda, [45] çalışmasında tanımladığı bu yöntemin önceki yöntemleri tamamladığını ve MgB<sub>2</sub> tellerindeki yüksek alan sabitleme merkezlerinin daha iyi analiz edilmesine olanak sağladığını rapor etmiştir. Bu yöntemde  $F_{p,max}$  değerine ihtiyaç duyulmadan  $J_c$ ’nin  $B/B_{irr}$ ’ye göre grafikleri oluşturularak belli  $B/B_{irr}$  değerlerini belli çivilenme mekanizmalarına atfederek değerlendirme yapmaktadır. Buna

göre,  $0,00 < B/B_{irr} < 0,33$  aralığındaki baskın mekanizma yüzey çivileme merkezlerinden kaynaklanmaktadır ve DH denklemi  $(b)^{0,5} \cdot (1 - b)^2$  şeklindedir.  $0,30 < B/B_{irr} < 0,50$  aralığındaki baskın mekanizma ise nokta çivileme merkezlerinden kaynaklanmaktadır ve DH denklemi  $(b)^1 \cdot (1 - b)^2$  veya  $(b)^1 \cdot (1 - b)^1$  ile verilmektedir.

$0,50 < B/B_{irr} < 0,75$  aralığındaki baskın mekanizma çizgi çivileme merkezlerinden kaynaklanmaktadır ve DH denklemi  $(b)^1 \cdot (1 - b)^2$  veya  $(b)^1 \cdot (1 - b)^1$  ile verilmektedir.  $0,75 < B/B_{irr} < 0,80$  aralığındaki baskın mekanizma kristal örgüde ikame eden çivileme merkezlerinden kaynaklanmaktadır ve Gajda  $(b)^{2,3-3,9} \cdot (1 - b)^1$  denkleminin çivilenme mekanizmasının bu çeşidini iyi tanımladığını rapor etmiştir. Son olarak Gajda,  $0,80 < B/B_{irr} < 1,00$  aralığında ise pik etkisinden sorumlu çivilenme merkezlerinin aktif olduğunu ve  $(b)^{4,9} \cdot (1 - b)^1$  denkleminin çivilenme mekanizmasının bu çeşidini iyi tanımladığını rapor etmiştir [45]. Gajda'nın bu yaklaşımına göre numunelerimizin  $J_c$ 'nin  $B/B_{irr}$ 'ye göre grafikleri Şekil 6 (b)'de verildi. Şekil 6 (b) incelendiğinde, tüm numunelerde yüzey çivilenme mekanizmasının en etkin mekanizma olduğu bu bölgede sergilenen yüksek  $J_c$  değerleri sayesinde gözlemlendi.



Şekil 6. Numunelerin (a)  $F_p/F_{p,max}$ 'ın  $B/B_{irr}$ 'ye göre (b)  $J_c$ 'nin  $B/B_{irr}$ 'ye göre grafikleri

Ticari olarak temin edilebilen  $MgB_2$  tozu için de baskın çivilenme mekanizmasının yüzey çivilenmesi olduğu literatürde rapor edilmiştir [74]. Tüm numunelerin davranışı  $0,00 < B/B_{irr} < 1,00$  aralığında genel olarak incelendiğinde, A(95) ve B(91) numunelerin tüm aralıkta çok benzer davrandığı tespit edildi. C(86) numunesinde

ise diğer iki numuneden farklı olarak yüzey ve nokta çivilenmesinin daha yüksek olduğu, buna karşın yüksek manyetik alan bölgesinde etkin olan çizgi çivileme ve kristal örgüde ikame çivilenme merkezlerinin diğer iki numuneden kısmen daha az etkili olduğu görüldü. Buda Şekil 6 (a)’da DH yaklaşımını göstermek için oluşturulan  $F_p/F_{p,max} - B/B_{irr}$  grafiğinde C(86) numunesinin yüksek manyetik alan bölgesindeki farklı davranışını açıklamaya yardımcı oldu. C(86) numunesinde düşük saflıkta B öncül tozu ile elde edilen daha yüksek  $J_c$  değerlerinin nedeninin netleştirilmesi için çivilenme mekanizmalarının daha detaylı araştırılması gereklidir. Çivilenme mekanizmaları hakkında tane sınırları ve safsızlıklar ile ilgili bilgi edinilmesi ve açıklamaların desteklenebilmesi için SEM ve EDX gibi daha fazla analiz yapılması faydalı olacaktır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada temelde süperiletken malzeme üretim maliyetinin önemli bir kısmını oluşturan başlangıç kimyasallarının maliyeti göz önünde bulundurularak düşük saflıkta B kullanımı için, tamamen ülkemizde saflaştırılan düşük saflıkta Bor öncül tozları kullanılmıştır. Farklı saflıklardaki B öncül tozları kullanılarak in-situ yöntem çeşidi olan ve gözenekli yapı sorununa çözüm olarak önerilen Mg difüzyon metodu ile üretilen MgB<sub>2</sub> süperiletken örnekleri incelenmiştir. XRD sonuçları üzerinden yapılan mikro yapısal incelemede öncül düşük saflıkta B tozlarının saflık derecelerinden bağımsız olarak örgü parametrelerinin sabit kaldığı tespit edilmiştir. Numunelerdeki ikincil fazın MgO olduğu tespit edilmiş ve MgO oranları hem arıtım işlemi ile hem de Denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır. Her iki sonuç paralel bir eğilim göstermiş ve elde edilen en yüksek MgO oranı bile literatüre göre düşük bir seviyede kalmıştır. XRD sonuçları kullanılarak Scherrer denklemi ile kristal boyutları ve WH denklemi ile mikro gerinim değerleri hesaplanmıştır. Tüm numuneler için Scherrer ile hesaplanan kristal boyutları neredeyse sabit kalmıştır. WH ile hesaplanan mikro gerinim değerlerinde de belirgin bir fark tespit edilmemiştir. Numunelerinin kritik sıcaklık  $T_c$  değerleri  $M(T)$  eğrilerinden tespit edilmiştir. Numunelerinin  $T_c$  değerleri arasında büyük bir fark gözlenmemesine rağmen, öncül B tozunun saflığı azaldıkça artan bir eğilim göstermiştir.  $M(T)$  eğrilerinin genel olarak tüm numuneler için keskin bir geçiş sergilemesi, numunelerimizin tümünde iyi derecede bir homojenliğin göstergesi olmuştur. 5 ve 20 K’de gerçekleştirilen  $M(H)$  ölçümlerinde, 5 K’de akı sürüklenmesi gözlenmiştir. Genişletilmiş Bean Modeline göre gerçekleştirilen  $J_c$  hesaplarının sonucunda en yüksek  $J_c$  karakteristiğini C(86) numunesinde elde edilmiştir ve  $J_c$  değeri tüm numunelerde yüksek alanlarda hızlı bir şekilde bir düşüş sergilemiştir. Akı çivilenme mekanizmasının analizi ile tüm numunelerde genel olarak en baskın mekanizmanın yüzey çivilenme merkezlerinden kaynaklandığı, ancak nokta çivilenme merkezlerinin de katkısı olduğu tespit edilmiştir. Türkiye’de saflaştırılmış olan B kaynakları arasında %95,20, %91,10 ve %86,70 saflıklarındaki B öncülleri kullanılan bu çalışmada nispeten daha yüksek  $J_c$  ve  $T_c$  değerlerine %86,7 saflıkta B öncül tozu ile üretilen numunede ulaşıldığı gösterilmiştir. Ancak bu davranışın sebeplerinin netleştirilebilmesi için daha fazla ve çeşitli analize gerek vardır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2219-Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı (2014-2.Dönem: 1059B191401920) desteği ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız.

#### Kaynaklar

- [1] Nagamatsu, J, Nakagawa, N, Muranaka, T, Zenitani Y, Akimitsu J. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. Nature 2001; 410: 63-64. <https://doi.org/10.1038/35065039>
- [2] Barua S, Hossain MSA, Ma Z, Patel D, Mustapic M, Somer M, Acar S, Kokal I ve diğerleri. Superior critical current density obtained in MgB<sub>2</sub> bulks through low-cost carbon-encapsulated boron powder. Scripta Materialia 2015; 104: 37-40. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.04.003>
- [3] Badr MH, Ng KW. A new heat treatment to prepare high-quality polycrystalline and single crystal MgB<sub>2</sub> in a single process. Superconductor Science and Technology 2003; 16: 668. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/16/6/302>
- [4] Giunchi G, Ripamonti G, Cavallin T, Bassani E. The reactive liquid Mg infiltration process to produce large superconducting bulk MgB<sub>2</sub> manufactures. Cryogenics 2006; 46 (2-3): 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.11.011>
- [5] Bhagurkar A. Processing of MgB<sub>2</sub> Bulk Superconductor by Infiltration and Growth. London: Brunel Univeristy London, 2017. <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/14777>
- [6] Kitaguchi H, Matsumoto A, Kumakura H, Doi T, Yamamoto H, Saitoh K, Sosiati H, Hata S. MgB<sub>2</sub> films with very high critical current densities due to strong grain boundary pinning. Applied Physics Letters 2004; 85: 2842-2844. <https://doi.org/10.1063/1.1805195>

- [7] Prikhna TA, Eisterer M, Weber HW, Gawalek W, Kovylaev VV, Karpets MV, Basyuk TV, Moshchil VE. Nanostructural inhomogeneities acting as pinning centers in bulk MgB<sub>2</sub> with low and enhanced grain connectivity. *Superconductor Science and Technology* 2014; 27: 044013. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/4/044013>
- [8] Durrell JH, Dancer CEJ, Dennis A, Shi Y, Xu Z, Campbell AM, Hari Babu N, Todd RI, Grovenor CRM, Cardwell DA. A trapped field of >3 T in bulk MgB<sub>2</sub> fabricated by uniaxial hot pressing. *Superconductor Science and Technology* 2012; 25: 112002. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/11/112002>
- [9] Kodama M, Kotaki H, Suzuki T, Tanaka H. Relation between constituent material fraction in multifilamentary MgB<sub>2</sub> wires and requirements for MRI magnets. *Superconductor Science and Technology* 2022; 35: 094007. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac8317>
- [10] Patel D, Matsumoto A, Kumakura H, Maeda M, Kim SH, Hossain MSA, Choi S, Kim JH. MgB<sub>2</sub> for MRI applications: dual sintering induced performance variations in in situ and IMD processed MgB<sub>2</sub> conductors. *Journal of Materials Chemistry C* 2020; 8: 2507-2516. <https://doi.org/10.1039/C9TC06114B>
- [11] Kodama M, Kotaki H, Ohara S, Ichiki Y, Fujita S, Suzuki T, Tanaka H, Aoki M. Feasibility study of novel rapid ramp-down procedure in MgB<sub>2</sub> MRI magnet using persistent current switch with high off-resistivity. *Superconductor Science and Technology* 2021; 34: 074003. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac034f>
- [12] Zhang R. The Potential Superconducting Materials in MRI Scanner—Comparison between NbTi and MgB<sub>2</sub>. *Highlights in Science, Engineering and Technology* 2023; 29: 308-315. <https://doi.org/10.54097/hset.v29i.4845>
- [13] Zhang Z, MacManus-Driscoll J, Suo H, Wang Q. Review of synthesis of high volumetric density, low gravimetric density MgB<sub>2</sub> bulk for potential magnetic field applications. *Superconductivity* 2022; 3: 100015. <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2022.100015>
- [14] Knott J, Commins PA, Moscrop J, Dou SX. Design considerations in MgB<sub>2</sub>-based superconducting coils for use in saturated-core fault current limiters. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2014; 24 (5): 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2340459>
- [15] Ye L, Majoros M, Campbell AM, Coombs T, Astill D, Harrison S, Husband M, Rindfleisch M ve diğerleri. Experimental studies of the quench behaviour of MgB<sub>2</sub> superconducting wires for fault current limiter applications. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20 (7): 621. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/7/007>
- [16] Smith AC, Oliver A, Pei X, Husband M, Rindfleisch M. Experimental testing and modelling of a resistive type superconducting fault current limiter using MgB<sub>2</sub> wire. *Superconductor Science and Technology* 2012; 25 (12): 125018. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/12/125018>
- [17] Lolli L, Li T, Portesi C, Taralli E, Acharya N, Chen K, Rajteri M, Cox D ve diğerleri. Micro-SQUIDS based on MgB<sub>2</sub> nano-bridges for NEMS readout. *Superconductor Science and Technology* 2016; 29 (10): 104008. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/10/104008>
- [18] Magnusson N, Hellesø SM, Mikkonen R, Abrahamsen AB, Runde M, Berg G, Nysveen A. Testing of an MgB<sub>2</sub> coil for a wind turbine generator pole. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2021; 587: 1353901. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2021.1353901>
- [19] Kalsi SS, Badcock RA, Storey JG, Hamilton KA, Jiang Z. Motors Employing REBCO CORC and MgB<sub>2</sub> Superconductors for AC Stator Windings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2021; 31 (9): 1-7. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3113574>
- [20] Hossain MSA, Motaman A, Xun X, See KW, Çiçek Ö, Ağıl H, Ertekin E, Gencer A ve diğerleri. Structurally homogeneous MgB<sub>2</sub> superconducting wires through economical wet mixing process. *Materials Letters* 2013; 91: 356-358. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.105>
- [21] Noudem JG, Xing Y, Bernstein P, Retoux R, Higuchi M, Arvapalli SS, Muralidhar M, Murakami M. Improvement of critical current density of MgB<sub>2</sub> bulk superconductor processed by Spark Plasma Sintering. *Journal of the American Ceramic Society* 2020; 103 (11): 6169-6175. <https://doi.org/10.1111/jace.17366>
- [22] Kodama M, Suzuki T, Tanaka H, Okishiro K, Okamoto K, Nishijima G, Matsumoto A, Yamamoto A ve diğerleri. High-performance dense MgB<sub>2</sub> superconducting wire fabricated from mechanically milled powder. *Superconductor Science and Technology* 2017; 30: 044006. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa5f36>
- [23] Kobayashi H, Muralidhar M, Koblichka MR, Inoue K, Murakami M. Improvement in the Performance of Bulk MgB<sub>2</sub> Material through Optimization of Sintering Process. *Physics Procedia* 2015; 65: 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.127>
- [24] Dadiel JL, Naik SPK, Peczkowski P, Sugiyama J, Ogino H, Sakai N, Kazuya Y, Warski T ve diğerleri. Synthesis of Dense MgB<sub>2</sub> Superconductor via In Situ and Ex Situ Spark Plasma Sintering Method. *Materials* 2021; 14 (23): 7395. <https://doi.org/10.3390/ma14237395>
- [25] Muralidhar M, Shadab M, Srikanth AS, Jirsa M, Noudem J. Review on high-performance bulk MgB<sub>2</sub> superconductors. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2024; 57: 053001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad039a>
- [26] Hossain MSA, Mustapic M, Gajda D, Senatore C, Patel D, Yamauchi Y, Shahbazi M, Flukiger, R. Significant reduction of critical current anisotropy in malic acid treated MgB<sub>2</sub> tapes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2020; 497: 166046. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166046>
- [27] Erdem O, Kirat G. Influence of coronene addition on some superconducting properties of bulk MgB<sub>2</sub>. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2018; 29: 17222-17233. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9816-3>
- [28] Duz I, Guner SB, Erdem O, Demir I, Kapucu V, Çelik Ş, Ozturk K, Hossain MSA, Gencer A, Yanmaz E. Comparison of Levitation Forces of Bulk MgB<sub>2</sub> Superconductors Produced by Nano Boron and Carbon-Doped Nano Boron. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2014; 27: 2241-2247. <https://doi.org/10.1007/s10948-014-2602-4>

- [29] Ma Z, Liu Y, Shi Q, Zhao Q, Gao Z. Effect of Cu addition in reduction of MgO content for the synthesis of MgB<sub>2</sub> through sintering. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 471 (1-2): 105-108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.098>
- [30] Ghorbani SR, Farshidnia G, Wang XL, Dou SX. Flux pinning mechanism in SiC and nano-C doped MgB<sub>2</sub>: evidence for transformation from  $\delta$ Tc to  $\delta$ l pinning. *Superconductor Science and Technology* 2014; 27 (12): 125003. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/12/125003>
- [31] Kovac P, Husek I, Melisek T, Grivel JC, Pachla W, Strbik V, Diduszko R, Homeyer J, ve diğerleri. The role of MgO content in ex situ MgB<sub>2</sub> wires. *Superconductor Science and Technology* 2004; 17 (10): L41. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/10/L03>
- [32] Malagoli A, Braccini V, Bernini C, Romano G, Vignolo M, Putti M, Ferdeghini C. Study of the MgB<sub>2</sub> grain size role in ex situ multifilamentary wires with thin filaments. *Superconductor Science and Technology* 2010; 23 (2): 025032. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/2/025032>
- [33] Perini E, Giunchi G, Saglietti L, Albisetti AF, Matrone A, Cavaliere V. Magnetic Field Trapping in MgB<sub>2</sub> Bulks and Inserts. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2011; 21 (3): 2690-2693. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2086043>
- [34] Gajda D, Babij M, Zaleski A, Avcı D, Karaboğa F, Yetiş H, Belenli İ, Czujko T. Investigation of Layered Structure Formation in MgB<sub>2</sub> Wires Produced by the Internal Mg Coating Process under Low and High Isostatic Pressures. *Materials* 2024; 17 (6): 1362. <https://doi.org/10.3390/ma17061362>
- [35] Yetiş H, Avcı D, Karaboğa F, Aksoy C, Gajda D, Martinez E, Tanyıldızı FM, Zaleski A, Babij M, Tran ML, Angurel LA, de la Fuente GF, Belenli İ. Transport and structural properties of MgB<sub>2</sub>/Fe wires produced by redesigning internal Mg diffusion process. *Superconductor Science and Technology* 2022; 35: 045012. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac5339>
- [36] Xiong X, Wang Q, Yang F, Feng J, Li C, Yn G, Zhang P. Improved superconducting properties of multifilament internal Mg diffusion processed MgB<sub>2</sub> wires by rapid thermal processing. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2021; 580: 1353800. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2020.1353800>
- [37] Patel D, Matsumoto A, Kumakura H, Moronaga T, Hara Y, Hara, T, Maeda M, Hossain MSA, Yamauchi Y, Choi S, Kim JH. Superconducting Joining Concept for Internal Magnesium Diffusion-Processed Magnesium Diboride Wires. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2021; 13 (2): 3349-3357. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17385>
- [38] Avcı D, Yetiş H, Gajda D, Babij M, Tran LM, Karaboğa F, Aksoy C, Zaleski A, Belenli I. Optimized superconducting MgB<sub>2</sub> joint made by IMD technique. *Superconductor Science and Technology* 2023; 36: 075004. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/accf3f>
- [39] Zhao W, Suo H, Wang S, Ma L, Wang L, Wang Q, Zhang Z. Mg gas infiltration for the fabrication of MgB<sub>2</sub> pellets using nanosized and microsized B powders. *Journal of the European Ceramic Society* 2022; 15: 7036-7048. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.029>
- [40] Wang C, Ma Y, Zhang X, Wang D, Gao Z, Yao C, Wang C, Oguro H ve diğerleri. Effect of high-energy ball milling time on superconducting properties of MgB<sub>2</sub> with low purity boron powder. *Superconductor Science and Technology* 2021; 25 (3): 035018. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/3/035018>
- [41] Wu YF, Lu YF, Li JS, Chen SK, Yan G, Pu MH, Li CS, Zhang PX. The microstructures and superconducting properties of MgB<sub>2</sub> bulks prepared by a high-energy milling method. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2007; 467 (1-2): 38-42. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.08.010>
- [42] Arvapalli SS, Muralidhar M, Murakami M. High-Performance Bulk MgB<sub>2</sub> Superconductor Using Amorphous Nano-boron. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2019; 32: 1891-1895. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4919-x>
- [43] Zhou S, Pan AV, Horvat J, Qin MJ, Liu HK. Effects of precursor powders and sintering processes on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>. *Superconductor Science and Technology* 2004; 17 (9): S528. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/9/014>
- [44] Xu X, Santos DID, Kim JH, Yeoh WK, Qin MJ, Konstantinov K, Dou SX. Effect of Boron powder purity on superconducting properties of bulk MgB<sub>2</sub>. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2007; 460-462 (1): 602-603. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.04.112>
- [45] Gajda, D. Analysis Method of High-Field Pinning Centers in NbTi Wires and MgB<sub>2</sub> Wires. *Journal of Low Temperature Physics* 2019; 194: 166-182. <https://doi.org/10.1007/s10909-018-2076-z>
- [46] Alecu G, Cosac A, Zamfir S. Superconductivity in MgB<sub>2</sub>. *Annals of the University of Craiova. Electrical Engineering Series* 2006; 30: 382-385.
- [47] Varghese N, Vinod K, Rao A, Kuo YK, Syamaprasad U. Enhanced superconducting properties of bulk MgB<sub>2</sub> prepared by in situ Powder-In-Sealed-Tube method. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 470, (1-2): 63-66. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.056>
- [48] Safran S, Kiliç A, Asikuzun E, Kılıçarslan E, Ozturk O, Gencer A. Influence of different boron precursors on superconducting and mechanical properties of MgB<sub>2</sub>. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2014; 25: 2737-2747. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-1937-8>
- [49] Savaskan B, Ozturk UK, Güner SB, Abdioglu M, Bahadır MV, Acar S, Somer M, Ionescu AM, Locovei C, Enculescu M, Badica P. Bulk MgB<sub>2</sub> superconductor for levitation applications fabricated with boron processed by different routes. *Journal of Alloys and Compounds* 2023; 961: 170893. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170893>
- [50] Durmuş H, Kocabaş K. The influence of Mn nanoparticles on superconducting properties and pinning mechanism of MgB<sub>2</sub>. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2022; 33: 17079-17089. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08584-0>

- [51] Lim JH, Jang SH, Hwang SM, Choi JH, Joo J, Kang WN, Kim C. Effects of the sintering temperature and doping of C60 and SiC on the critical properties of MgB<sub>2</sub>. *Physica C: Superconductivity* 2008; 468 (15-20): 1829-1832. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.233>
- [52] Zhou S, Pan AV, Dou SX. An attempt to improve the superconducting properties of MgB<sub>2</sub> by doping with Zn-containing organic compound. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 487 (1-2): 42-46. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.046>
- [53] Sinha BB, Kadam MB, Mudgel M, Awana VPS, Kishan H, Pawar SH. Synthesis and characterization of excess magnesium MgB<sub>2</sub> superconductor under inert carbon environment. *Physica C: Superconductivity* 2010; 470 (1): 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.09.010>
- [54] Husekova K, Husek I, Kovac P, Kulich M, Dobrocka E, Strbik V. Properties of MgB<sub>2</sub> superconductor chemically treated by acetic acid. *Physica C: Superconductivity* 2010; 470 (5-6): 331-335. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.02.001>
- [55] Zhang Z, Suo H, Ma L, Zhang T, Liu M, Zhou M. Critical current density in MgB<sub>2</sub> bulk samples after co-doping with nano-SiC and poly zinc acrylate complexes. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2011; 471 (21-22): 908-911. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.086>
- [56] Kim JH, Dou SX, Rindfleisch M, Tomsic M. Study of MgO formation and structural defects in in situ processed MgB<sub>2</sub>. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20 (10): 1026-1031. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/10/023>
- [57] Qin F, Cai Q, Chen H. Partial dissolution of MgO and the effect on critical current density in urea-doped MgB<sub>2</sub> bulks. *Journal of Alloys and Compounds* 2015; 633: 201-206. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.02.018>
- [58] Singh DK, Tiwari B, Jha R, Kishan H, Awana VSP. Role of MgO impurity on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2014; 505: 104-108. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.06.004>
- [59] Jiang CH, Hatakeyama H, Kumakura H. Effect of nanometer MgO addition on the in situ PIT processed MgB<sub>2</sub>/Fe tapes. *Physica C: Superconductivity* 2005; 423, (1-2): 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2005.03.022>
- [60] Mostafa MYA, Mostafa A, Abdel-Rahman M, Assem EE, Ashour A, Badawi EA. XRD peak broadening modelling for Al-alloys characterization compared with Rietveld profile analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.252>
- [61] Scherrer P. Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* 1918; 26: 98-100.
- [62] Williamson GK, Hall WH. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta Metallurgica* 1953; 1 (1): 22-31. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(53\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6)
- [63] Lee JH, Shin SY, Kim CJ, Park HW. Superconducting properties of MgB<sub>2</sub> prepared from attrition ball-milled boron powder. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 476 (1-2): 919-924. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.09.197>
- [64] Kim JH, Dou SX, Shi DQ, Rindfleisch M, Tomsic M. Study of MgO formation and structural defects in in situ processed MgB<sub>2</sub>/Fe wires. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20 (10): 1026-1031. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/10/023>
- [65] Maeda M, Choi JH, Knott JC, Kim JH, Hahn G, Kang H, Hahn S, Choi S. Disorder anisotropy of layered structure in multi-band MgB<sub>2</sub> superconducting materials with high critical current performance. *Journal of Alloys and Compounds* 2023; 934: 167873. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167873>
- [66] Eisterer M. Magnetic properties and critical currents of MgB<sub>2</sub>. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20, (12): R47-R73. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/12/R01>
- [67] Kim JH, Dou SX, Wang JL, Shi DQ, Xu X, Hossain MSA, Yeoh WK, Choi S, Kiyoshi T. The effects of sintering temperature on superconductivity in MgB<sub>2</sub>/Fe wires. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20: 448-451. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/5/007>
- [68] Bean CP. Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters* 1962; 8 (6): 250-252. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>
- [69] Felner I, Awana VPS, Mudgel M, Kishan H. Avalanche of flux jumps in polycrystalline MgB<sub>2</sub> superconductor. *Journal of Applied Physics* 2007; 101: 09G101. <https://doi.org/10.1063/1.2669959>
- [70] Dadiel JL, Sugiyama J, Sakai N, Takemura K, Oka T, Ogino H, Muralidhar M, Murakami M. Improved Connectivity of MgB<sub>2</sub> Bulk Superconductor via In Situ-Ex Situ Co-synthesis. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2023; 36: 1097-1102. <https://doi.org/10.1007/s10948-023-06549-w>
- [71] Koblishka MR, Murakami M. Pinning mechanisms in bulk high-T<sub>c</sub> superconductors. *Superconductor Science and Technology* 2000; 13 (6): 738. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/6/321>
- [72] Dew-Hughes D. Flux pinning mechanisms in type II superconductors. *Philosophical Magazine* 1974; 30: 293-305. <https://doi.org/10.1080/14786439808206556>
- [73] Koblishka MR, Wiederhold A, Koblishka-Veneva A, Chang C, Berger K, Nouailhetas Q, Douine B, Murakami M. On the origin of the sharp, low-field pinning force peaks in MgB<sub>2</sub> superconductors. *AIP Advances* 2020; 10: 015035. <https://doi.org/10.1063/1.5133765>
- [74] Matsumoto Y, Shigeta I, Abiru T, Terasaki Y, Akune T, Sakamoto N. Critical current density and flux pinning characteristics of powdered MgB<sub>2</sub> specimens. *Physica C: Superconductivity* 2003; 2388-389: 163-164. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)02707-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)02707-7)
- [75] Kalsi SS, Hamilton KA, Badcock RA. Superconducting rotating machines for aerospace applications. 2018 Joint Propulsion Conference, Cincinnati, OH, USA. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4796>
- [76] Gao Z, Ma Y, Zhang X, Wang D, Yu Z, Yang H, Wen H, Mossang E. Enhancement of the critical current density and the irreversibility field in maleic anhydride doped MgB<sub>2</sub> based tapes. *Journal of Applied Physics* 2007; 102: 013914. <https://doi.org/10.1063/1.2748711>



- [77] Fujii H, Kitaguchi H. Superconducting properties of sintered ex situ MgB<sub>2</sub> tapes through ball milling process as a function of crystallite size in the as-milled and sintered states. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2021; 583: 1353838. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2021.1353838>
- [78] Tripathi D, Dey TK. Effect of (Bi, Pb)-2223 addition on thermal transport of superconducting MgB<sub>2</sub> pellets. *Journal of Alloys and Compounds* 2015; 618: 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.065>

## İnsansız Hava Araçlarında Nokta Bulutu Verisi Kullanılarak İniş Pisti Uygunluk Analizi

Ebru KARAKÖSE<sup>1\*</sup>, Melike AKSU<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*</sup> eozbay@firat.edu.tr, <sup>2</sup> aksumelike23@gmail.com

(Geliş/Received: 24/11/2023;

Kabul/Accepted: 17/04/2024)

**Öz:** İnsansız hava araçları (İHA) açısından gelişen teknoloji ile birlikte kullanım alanları ve üzerlerinde yapılan araştırma çalışmaları her geçen gün artmaktadır. Her ne kadar insansız olarak adlandırılınsalar da İHA'lar bir pilot/uçuş görevlisi yardımıyla kontrol edilmekte ya da otonom uçuşları programlanmaktadır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda, yaşanan sorunların ve kazaların büyük bir kısmının İHA'ların inişi sırasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu oranı azaltacak şekilde iniş aşamasında, iniş pistinin görüntü işleme yöntemleri ile tespit edilmesi ve nokta bulutu sayesinde pistte bulunan engellerin analiz edilmesi bu konuda atılacak önemli bir adımdır. Bu nedenle bu çalışmada, İHA iniş sistemlerinde kullanılabilecek ve derin öğrenme ağlarıyla sağlanabilecek uygulamalara yer verilmiştir. Öncelikle, analizi gerçekleştirilecek olan iniş pistinin tasarımı yapılmıştır. Bu pist, çevresinde farklı araç ve engellerin bulunduğu bir ortama bırakılmıştır. Daha sonra, pistin dört rotorlu bir İHA ile farklı yükseklik ve açılardan gerçek görüntüleri ve video kaydı alınmıştır. Alınan görüntüler daha sonra görüntü işleme ve eğitim aşamalarına tabi tutulmak için kullanılmıştır. İHA'nın iniş yapacağı pistin gerçek görüntülerinin alınması, bir veri seti oluşturulması ve alınan bu görüntülerin YOLOv8'de işlenmesi sonucunda İHA iniş pisti tespiti sağlanmıştır. İniş pisti tespitinin ardından pist üzerinde engel bulunma ve bulunmama durumları nokta bulutu verisi kullanılarak incelenmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Siyah-beyaz ve renkli şekilde verilen derinlik haritaları ile uygulama tamamlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Görüntü İşleme, İHA İniş Sistemi, Nokta Bulutu, RoboFlow, YOLO.

## Landing Runway Suitability Analysis Using Point Cloud Data in Unmanned Aerial Vehicles

**Abstract:** With the development of technology in terms of unmanned aerial vehicles (UAV), their usage areas and research studies on them are increasing by the time. Although they are called unmanned, UAVs are controlled with the help of a pilot or flight attendant, or their autonomous flights are programmed. In line with the research, it has been determined that most of the problems and accidents occur during the landing of UAVs. In order to reduce this rate, detecting the landing runway with image processing methods and analyzing the obstacles on the runway with the point cloud method during the landing phase is an important step to be taken in this regard. For this reason, this study includes applications that can be used in UAV landing systems and provided with deep learning networks. First of all, the landing runway to be analyzed has been designed. This runway is left in an environment with different vehicles and obstacles around it. Later, real images and video recordings of the runway are taken from different heights and angles with a four-rotor UAV. The captured images have then been used to undergo processing and training stages. UAV landing runway detection has been achieved as a result of taking real images of the runway where the UAV would land, creating a dataset, and processing these images in YOLOv8. After the landing runway has been determined, the presence or absence of obstacles on the runway has been examined and analyzed using the point cloud data. The application has been completed, with depth maps provided in black-and-white and RGB form.

**Key words:** Image Processing, UAV Landing System, Point Cloud, RoboFlow, YOLO.

### 1. Giriş

İnsansız Hava Aracı (İHA), adından da anlaşılacağı gibi içinde yolcu veya pilot bulundurmadan uzaktan kontrol edilen veya otonom şekilde uçuşunu sağlayan bir çeşit hava aracıdır. Kullanıldığı alana, amaca ve göreve göre uygun donanımlar ile (kamera, sensör vb.) donatılarak uçabilme özelliğine sahiptir. Başta askeri ve sivil alanlarda olmak üzere hem ülkemizde hem de tüm dünyada kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Kullanım hızının artmasına bağlı olarak üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar ve araştırmalar da önemli derecede hız kazanmıştır. Doğru kullanıldığı durumlarda, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlaması amacıyla birçok farklı alanda ve meslek dalında kullanılabilmektedir. İHA'ların sahip oldukları avantajlar ile askeri, sivil ve bilimsel amaçlı profesyonel kullanımlarının sürekli artmasına bağlı olarak önümüzdeki yıllarda da bu araçların daha fazla ilgi odağı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca İHA'ların hem ticari hem de spor ya da eğlence amaçlı bu kadar çok

\* Sorumlu yazar: [eozybay@firat.edu.tr](mailto:eozybay@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1191-6375, <sup>2</sup> 0000-0002-6695-1592

kullanılıyor olması bu sistemler üzerinde yapılan araştırma ve uygulama çalışmalarının daha detaylı ve hassas bir şekilde yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır [1-7].

Makine öğrenmesi açısından yapay sinir ağları (YSA) birçok sorunun çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin sahip olduğu kendine has sorunlar ve donanımsal olarak bazı sınırlamalar nedeniyle bu konuda yapılan çalışmalar belirli bir dönem durmuş ardından tekrar ilgi alanı olmaya devam etmiştir. YSA uygulamaları, grafik işlem birimi sistemlerinin gelişmeleriyle birlikte derin ağlara doğru geçiş yapmaya, görüntü işleme, doğal dil işleme ve daha farklı birçok sistemde kullanılmaya başlamışlardır. YSA'ların tarihsel gelişimiyle, derin öğrenme ağlarına geçiş uzun çalışmalar sonucunda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ağlar sayesinde makineler öğrenme özelliği kazandırılarak özerk yani otonom olarak çalışmaları sağlanmıştır. Yapay zekânın başlıkları altında yer alan yaklaşımlardan biri derin öğrenmedir. Derin öğrenme makine öğrenmesi alanı altında son yıllarda oldukça fazla kullanılan yeni bir tekniktir. Ayrıca makinenin verileri çevresinden öğrenmesini ve böylelikle performansını zaman içerisinde geliştirmesi üzerine bir yaklaşımdır. Makine öğrenmesiyle sınıflandırma ve kümeleme işlemleri, gözetimli ve gözetimsiz yöntemleri kullanılarak sağlanmaktadır. Makine öğrenmesinde, insan faktörü kullanılmadan, karmaşık sistemlerin, algoritmaların vb. sistemlerin daha hızlı öğrenilmesini sağlamak için derin öğrenme büyük fayda sağlamaktadır. Literatürde derin öğrenmenin birbirinden farklı birçok tanımı vardır. Temelde, insan beyninde bulunan nöron dediğimiz sinir hücrelerinin birbiriyle iletişiminin yapay bir şekilde taklit edilmesine dayanır. Aslında derin öğrenme insan beyninin karmaşıklığını ve sorun çözme yeteneklerini taklit etmek için kullanılan ve çok büyük miktarda veri kullanan bir makine öğrenmesi türüdür. Sinir ağları ise hiyerarşik olasılık modelleri ve birçok özel denetimli ve denetimsiz özellik öğrenme algoritmaları gibi çeşitli yöntemler içermektedir [8, 9]. Bu alanda yapılan bir çalışmada, derin öğrenmenin tarihi geçmişi, bu alanda geliştirilen yöntemler ve uygulama konularına göre ayrımlarından bahsedilmiştir. Dahası son dönemlerde bu alanda fayda sağlayan alt sistemler ve bu konu üzerine odaklanan çalışmalar hakkında açıklamalara da yer verilmiştir. Çalışmanın hedefi olarak ise bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara derin öğrenme uygulamalarında elde edilen ilerlemeleri anlatmak ve bu sayede çalışılabilir olan konuları vermek olarak açıklanmıştır [10]. Ayrıca literatürde derin öğrenme tabanlı ve özellikle otonom çalışan İHA'lar için farklı amaçlara sahip birçok çalışma ve uygulama gerçekleştirilmiştir [11,12].

Sistemlerin tasarım aşamasında bir model üretimine geçilmeden önce, çalışma sistemini anlamak ve sorunları görmek adına yapılması gereken temel işlemler matematiksel modelinin çıkartılması ve o modelin sayısal olarak test edilmesi uygulamalarıdır. Yapılan modellemeler bazen gerçek sonuçlar ile birebir aynı olmasa da model üzerinde ön fikirler oluşturmaya yardımcı olmaktadır [13-17]. Yapısal olarak farklılıkları ve matematiksel modeli göz önüne alındığında bir İHA için inişin ne kadar riskli ve zor bir aşama olduğu bilinmektedir. Önemli olan bu aşamanın en kolay ve en az kayıpla gerçekleştirilmesidir. İnişini gerçekleştiren İHA'ların bu sırada izlediği adımlar ve kullanılan yöntemler bu konuda mutlak derecede önemlidir. Normal bir iniş, İHA'ya takılan kameralar, sahip olduğu denetleyiciler ve sensörler sayesinde gerçekleştirilmektedir. LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) teknolojisinin kullanıma geçmesiyle, gelişmesi aynı oranda artmıştır. Bu teknoloji, aynı zamanda nokta bulutu yönteminin gelişmesine de zemin hazırlamıştır. Havadan veya karadan, farklı açılarla yapılan taramalarla elde edilen nokta bulutun oluşturulması için aktif sensörler ve lazer tarayıcılar kullanılmaktadır. Nokta bulutu elde edilmek istenen nesne için ortak bir yaklaşım oluşturularak geometrik girdiler meydana getirilmekte ve milyonlarca nokta nesne üzerinde konumlanarak, nesnenin nokta bulutunun oluşturulması sağlanmaktadır [18-21].

Teknolojinin ve İHA'ların gelişimi sayesinde birçok alanda kullanılan İHA'lardan elde edilen görüntüler üzerinde nokta bulutu verileri kullanılarak haritalar oluşturulabilmiştir. İHA ile bütünleştirilecek olan sensör veya ışık algılayıcı mesafe ölçen (LIDAR) yardımıyla kapalı ve açık ortamlarda bulunan nesnelerin taranması gerçekleştirilerek üç boyutlu bir şekilde nokta bulutu oluşturulmaktadır. Literatür incelendiğinde yapılan bir çalışmada derin öğrenme ağlarıyla üç boyutlu nokta bulutlarının sınıflandırılması üzerine genel bir bakış sunulmuştur. Çalışmada, üç boyutlu nokta bulutunun gelişen teknolojiyle birlikte sınıflandırma, algılama ve tanıma alanlarında kullanıldığı belirtilmiştir. Lazer tarama sistemleri ile nesnelere taranarak üç boyutlu nokta bulutuna dönüştürülmüştür. Kullanılan yöntemler ve algoritmalar için başarı durumları, faydalı ve eksik yönleri açıklanarak karşılaştırmalar yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalara yardımcı olacağı düşünülen bilgilere de yer verilmiştir [22].

Günümüzde halen çeşitli sebeplerden dolayı İHA'lar havadayken veya inerken arızalanıp düşebilmektedir. Bu nedenle, bu arıza ve düşmelerin azaltılması gerekmektedir. Birçok İHA, GPS (Global Position System-Küresel Konumlandırma Sistemi) sinyallerini kullanır ve GPS sinyalleri eksik olduğunda, İHA'lar düzgün bir şekilde inemez. Ancak, optik donanım ve görüntü tanıma teknolojileri yardımıyla, İHA üç boyutlu görüntü elde edilebilir ve bulunduğu ortamı algılayabilir. Gerçekleştirilen [23] numaralı çalışmada, acil durumlarda ve yapılandırılmamış ortamlarda monoküler görüş tabanlı bir İHA otonom iniş sistemi önerilmekte ve uygulanmaktadır. Bu sistemde, görüntüyü gidermek ve farklı yüksekliklerde bir izgara haritası oluşturmak için üç boyut özellikleri ve bir orta geçiş filtresini birleştiren yeni bir harita yaklaşımı önerilmiştir. Ek olarak sonraki iniş alanı seçiminin hızını ve doğruluğunu iyileştirmek amacıyla farklı yükseklikteki izgara alanlarının kenarlarını algılamak için bir bölge

segmentasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada önerilen algoritmanın iki amaçla kullanıldığı belirtilmiştir. Bunlar, iniş alanının yeniden yapılandırma bütünlüğü sağlamak ve iniş yeri güvenliği olarak belirlenmiştir. Bu amaçlarla, öncelikle İHA iniş alanını taramış ve monoküler görsel eş zamanlı yerleştirme ve haritalama sistemindeki anahtar kareleri elde etmiştir. Ortamı tahmin ettikten sonra ise üç boyutlu bir nokta bulutu haritası oluşturulmuştur. Daha sonra filtrelenmiş üç boyutlu nokta bulutu haritası ızgara haritasına dönüştürülmüştür. Izgara haritası, uygun iniş bölgesini seçmek için farklı bölgelere ayrılmıştır. Böylece otonom rota planlaması yapılabilmektedir. Son olarak ise çalışma farklı alanlarda deneyerek yapılabilirliği kontrol edilmiştir.

Üç boyutlu bina modellemesi, doğal afetlerin izlenmesi, kentsel kullanım alanlarının belirlenmesi, haritalandırma, hava kalitesinin ölçülmesi gibi çalışmalarda uzaktan algılama kullanılmaktadır. Uzaktan algılamayla alınan görüntülerin işlenmesi gerekmektedir. Alınan görüntüler nokta bulutları haline getirilerek işlenebilmektedir. Görüntü işleme yapılırken lazer tarayıcıdan alınan görüntülerin veya ölçüm sonuçlarından elde edilen nokta bulutları düzensiz bir yapıya sahiptir. Büyük oranda ve düzensiz halde gelen işlenmemiş üç boyutlu nokta bulutu verilerinin işlenerek anlamlı hale gelmesi için bilgisayarlı görü yöntemi kullanılmaktadır. Bilgisayarla görü uygulamalarında evrimsel sinir ağlarının (Convolutional Neural Networks-CNN) kullanılmaya başlanması ve hem yazılımsal hem de donanımsal gelişmeler sayesinde bu alanda yapılan çalışmalar daha da artmıştır [24-26]. Bu konuda yapılan [27] numaralı çalışmada bilgisayarla görü alanında genel bilgilere yer verilerek bu alanda yapılan uygulamalardan ve bu tür sistemlerde probleme sebep olan etmenlerden bahsedilmiştir. Gerçekleştirilen [28] numaralı çalışmada ise okyanuslarda çevresel algılama amacıyla otonom hareket eden bir deniz aracının iniş pistini takip etmek ve inmek için otonom çalışan bir quadrotorun kontrol algoritması geliştirilmiştir. Algoritma, okyanuslarda rüzgârlar ve akıntılar nedeniyle yaygın olan (hedefin sallanmasına ve sürüklenmesine neden olan) zorlu iniş koşullarının zorluğunu üstlenmiştir. Quadrotor için geliştirilen ve iniş pisti algılama, MATLAB kullanılarak görüntü işleme teknikleriyle sağlanmıştır. Testlerin hem iç mekânlarda hem de dış mekânlarda ve açık su üzerinde büyük bir başarı oranı ile gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Quadrotor için oluşturulan bu otonom kontrol algoritmasının, çalışma bölgesini geliştirdiği, baz istasyonuna geri uçuşa ihtiyacı olmadığını ve böylece uzak okyanus konumlandırılmalarında uçuş süresinden tasarruf sağladığı söylenmiştir. Yine bu amaçlara uygun olarak tasarlanmış ve İHA'larda inişi konumlandırma amacıyla gerçekleştirilen farklı çalışmalar da bulunmaktadır [29, 30].

Bu çalışmada, görevini tamamlayıp inişe hazırlanan bir İHA'nın iniş pisti uygunluk analizinin nokta bulutu verisi sayesinde gerçekleştirmesine dair bilgilere yer verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda öncelikle İHA'larda inişin gerçekleşmesi ve iniş fazları konusu araştırılmıştır. Daha sonra derin öğrenme mimarileri ve derin öğrenme uygulamalarından bahsedilmiştir. Uygulama kısmında gerçek bir dört rotorlu İHA (quadrotor) tarafından alınan farklı görüntüler için RoboFlow ve YOLOv8 uygulamalarından elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve iniş pisti tespiti yapılmıştır. Tespiti yapılan pistin iniş için uygunluk analizi nokta bulutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları, başarı durumu ve geliştirilebilirliği üzerine gerekli bilgilere yer verilmiştir.

## 1.1. Problemin Tanımı

Uçuşun tüm aşamaları ele alındığında yüksek fiziksel kısıtlamaları nedeniyle en zorlu görev iniş aşamasında gerçekleşmekte ve kazaların büyük bir çoğunluğu da iniş aşamasında meydana gelmektedir. Bu nedenle, pilotlar inişlerine yardımcı olması için ILS (Instrument Landing System-Aletli İniş Sistemi) kullanılmaktadır. ILS pist başlarına yerleştirilmiş vericiler sayesinde inişe yardımcı olan bir yaklaşma sistemidir. Bu sistem, normal uçakların inişi için kullanıldığı gibi aynı zamanda İHA'lar içinde pilot yardımcı inişlerde kullanılmakta ve hem dikey hem de yatay düzlemde İHA'ların yönlendirilmesi için yol göstermektedir. İstatistiksel olarak ILS ve diğer yardımcı sistemler pilotların iş yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca pilotlar uçuş belirsizlikleri, olumsuz hava koşulları ve sistem arızası gibi istenmeyen durumları dikkate almak üzere eğitilirler. Pilot kontrolündeki İHA'larda inişin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için yerleşik sensörlerin kesinliği, aktuatörlerin performansı ve pilot becerileri önemli rol oynamaktadır. Bilindiği gibi İHA'ların iniş sürecindeki en büyük zorluklardan birisi iniş hedeflerinin belirlenmesidir. Çevre ve uçuş güzergâhı bilgilerinde ise görsel ölçümlerin doğruluğunun yüksek olması gerektiği bilinmektedir. INS (Inertial Navigation System-Atalet Seyrüsefer Sistemi) anında konumlandırma bilgisi sağlar ancak uzun süreli konumlandırma doğruluğunu garanti edemez. GPS ise açık alanlarda kullanılabilir, ancak bir miktarda olsa konumlandırma hatalarına neden olabilir ve binalar tarafından sinyalleri bloke edilebilir. Pilot kontrollü bir İHA'da insan etkisi büyük olacağından hata oranı yüksek, karar verme seviyesi düşük ve ek olarak da personele yorucu bir iş düşmektedir. İniş manevraları gibi karmaşık olaylarda da hata yapma istatistikleri oldukça fazladır. Bu durumlar araştırmacıları otomatik iniş sistemlerini veya inişi kolaylaştıracak sistemleri incelemeye yöneltmiştir. İHA'ların güvenli bir iniş gerçekleştirebilmesi için yüksek hassasiyetli konumlandırma sistemleri ve diğer sistemlerden doğru bilgiler alması gerekmektedir. Konum ve yönelim bilgileri için sıradan GPS ve IMU (Inertial Measurement Unit-Atalatsel Ölçüm Birimi) kullanılır. Çevre ve uçuş yolu bilgileri görsel

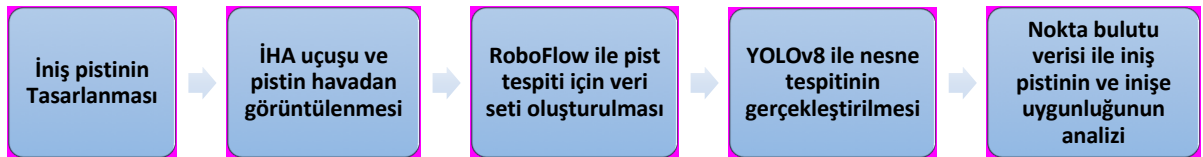
ölçümler (yerleşik bir kamera gibi) sayesinde doğrulanır. Ayrıca farklı uygulamalardan alınan dijital görüntüler sayesinde yüksek boyutlu verilerin çıkarılmasında da büyük bir ilerleme görülmektedir [31, 32].

İHA'lar için kaza oranlarının büyük çoğunluğu genellikle iniş aşamasında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada iniş anındaki hataları ve kazaları en az seviyeye indirgenebilmesi amacıyla araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda iniş anında iniş pisti üzerinde bulunan engellerin nokta bulutu verisi sayesinde analiz edilmesi sağlanmıştır. İHA'nın uçuşu anında, inişe hazırlanırken ve pist üzerinden uçarken pist görüntülerinin alınması ve alınan görüntülerin işlenerek nokta bulutu yardımıyla pist üzerindeki engellerin analiz edilmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma doğrultusunda pistin farklı açılardan ve yüksekliklerden alınan gerçek görüntülerinin, YOLOv8 kullanılarak çok hızlı bir şekilde görüntü kalitesi artırılmış ve görüntü işleme yapılmıştır. Pist görüntülerinin işlenmesi ve tespit edilmesi sonucunda pistin üzerinde bulunan engeller derinlik analizi yapılarak incelenmiştir. Ek olarak, İHA'lar kullanılarak alınan görüntülerden ve videolardan derin öğrenme temelli nesne tespiti yapılması üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [33-35]. Ancak bahsi geçen çalışmalar genellikle sadece hedeflenen nesnelerin tespiti üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulamada ise İHA ile alınan gerçek görüntülerden nesne tespiti ve iniş pisti tespiti yapıldıktan sonra asıl amaç pist üzerinde engel varlığının nokta bulutu yardımı ile analiz edilmesi olarak tanımlanmıştır. Bu bakımdan bu çalışma, farklı ve özgün bir öneri sunmaktadır. Ayrıca, İHA'lardan alınan görüntülerden nokta bulutu yardımı ile önemli binaların üç boyutlu modellerinin oluşturulduğu, haritalama yapıldığı ve bu haritalardan yol planlama uygulamalarının yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [36, 37]. Ancak nokta bulutu ile iniş pistinin analiz edilerek engel bulunma durumuna bağlı bir şekilde inişe uygunluğunun değerlendirilmesi temelli bu çalışma literatür açısından farklılık oluşturmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

İHA'lar için uçuş operasyonu esnasında en önemli aşama iniş aşamasıdır. İniş anında pistin uygunluğu, pistte herhangi bir engelin olup olmadığı iniş için önemli bir unsurdur. Bu çalışmada, iniş pisti nokta bulutu verisi sayesinde taranarak ve pist üzerinde bulunan engeller pistin derinliği algılanarak kolaylıkla ayırt edilmiştir. Nokta bulutu üç koordinat düzleminde de sayısal olarak binlerce noktadan oluşan, nesnenin dış yüzeyini temsil etmek için kullanılan üç boyutlu bir dijital çıktıdır. Nokta bulutuyla oluşturulan üç boyutlu veriler kalite kontrol, animasyon gibi alanlarda kullanıldığı gibi derin öğrenme yöntemleriyle birlikte kullanılarak görüntü işleme, şehir planlaması ve birçok alanda da kullanılmaktadır [38-40]. Nokta bulutları günümüzde değişik yöntemlerle elde edilebilmektedir. Havadan lazer tarama (Airborne Laser Scanning-ALS), hava araçları yardımıyla belirli bir irtifadan yeryüzünün taranmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntemde hızlı bir tarama gerçekleşmiş olur fakat görüş alanı kısıtlıdır. Yeryüzünde sabit noktalarda bulunan araçlarla yapılan lazer tarama (Terrestrial Laser Scanning -TLS) ise kullanılan ikinci bir yöntemdir. Bu yöntemin en büyük avantajı alanın istenilen açılarla daha yüksek ve doğru örnekler ile taranmasıdır. Dezavantajı ise tarayıcının alana yakın olması dar bir görüş alanı sağlarken ayrıca yüksek yoğunluklu tarama sonucu nokta bulutun işlenmesinin zorlaşmasıdır. ALS ve TLS haricinde kullanılan diğer bir yöntem ise taşınabilir mobil lazer taramadır. Bu yöntem taşıma kolaylığı ve hareket halindeyken de veri elde edilme imkanı sağlamaktadır. Bu yöntem iç ve dış mekânlarda kullanılan bir yöntemdir [41-43]. Tüm bu lazer kullanılan yöntemler haricinde ayrıca verilen fotoğrafın nokta bulutu haline getirildiği uygulamalar da bulunmaktadır.

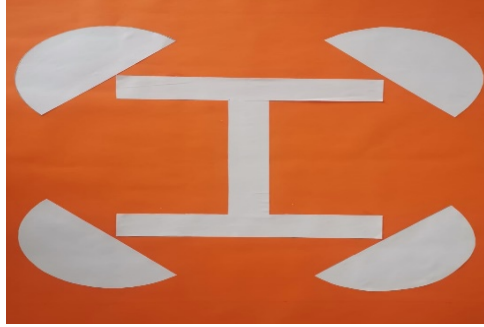
Bu çalışmada, görüntü işleme ve nokta bulutu ile iniş pisti analizi yapabilmek amacıyla öncelikle bir quadrotor ile inişin gerçekleştirilmesi için tasarlanan pistin havadan gerçek görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntülerden RoboFlow uygulamasında veri seti oluşturularak YOLOv8'de görüntü işleme için kullanılmıştır. İşleme sonucunda tespiti yapılan iniş pistinin üzerinde engel olup olmama durumuna göre nokta bulutu yardımıyla derinlik ölçülerek iniş pistinin inişe uygunluğu analiz edilmiştir. Çalışma yöntem aşamaları Şekil 1'de gösterilen akış şemasında verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma akış şeması.

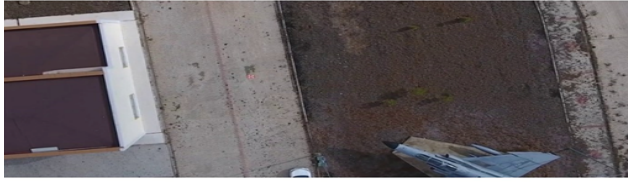
## 2.1. İniş Pistinin Tasarlanması ve Görüntülenmesi

Uçuşunu gerçekleştiren İHA'nın iniş sırasında zarar görmemesi için öncelikle bir iniş pisti tasarlanmıştır. Bu çalışmada, İHA'nın kolaylıkla görebileceği ve üzerine iniş sağlayacağı Şekil 2'de verilen iniş pisti oluşturulmuştur. Pist 50x70 cm boyutlarına ve doğada çok fazla bulunmayan turuncu rengine sahiptir. Ayrıca pist üzerinde uzaktan kolaylıkla algılanabilecek H harfi bulunmaktadır.

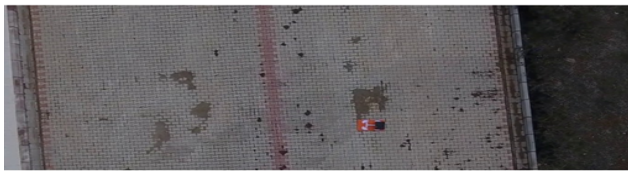


Şekil 2. Tasarlanan iniş pisti.

Pist görüntüsünün işlenebilmesi ve veri setinin oluşturulabilmesi için gerçek bir quadrotor ile farklı yükseklik ve farklı açılardan işlenecek gerçek pist görüntüleri ve video kaydı alınmıştır. Pist görüntüleri alınırken ayrıca pist üzerinde engel bulunacak şekilde de görüntüleme yapılmıştır. Üzerinde engel bulunmayan ve bulunan pist görüntüleri nokta bulutu ile derinlik ölçülüp analiz yapılırken kullanılmıştır. Şekil 3'te farklı yüksekliklerden alınmış engelsiz ve engelli pist görüntüleri verilmiştir.



(a) Engelsiz pist görüntüleri.



(b) Engelli pist görüntüleri.

Şekil 3. Farklı yükseklik ve açılardan alınmış engelsiz ve engelli pist görüntüleri.

## 2.2. RoboFlow ile Veri Seti Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında, pist üzerinden alınan video kaydından çıkarılan gerçek görüntüler ayrıştırılarak, YOLOv8'de işlenmek için öncelikle RoboFlow sayesinde veri seti oluşturulmuştur. RoboFlow, nesne algılama ve segmentasyon işlemleri için kullanılan yapay zeka algoritmalarının açık kaynaklı bir kitaplığıdır. Veri seti oluşturulurken elde edilen görüntülerde bulunan cisimler işaretlenerek YOLOv8'de gerçekleştirilecek öğrenmenin kolaylaştırılması sağlanmıştır.

Makine öğrenmesi uygulamalarında elde edilen veri setlerinin modellerde kullanılabilir hale getirilebilmeleri için bölme işlemine tabi tutulmaktadır. Böylece modellerin daha başarılı bir şekilde gerçek dünya ile uyumlu olması hedeflenmektedir. Bölme işlemi uygulama türüne ve göreve bağlı olarak değişmekle birlikte burada,

RoboFlow ile etiketlenen görseller YOLOv8’de eğitilebilmek için test, doğrulama ve eğitim veri setleri olarak bölünmüştür. Bu sayede, test veri seti üzerinde tahminler ve değerlendirmeler yapılırken, doğrulama veri setinde iyileştirmeler yapılmakta ve eğitim veri seti öğrenme amacı ile kullanılmaktadır. Bu çalışmada, öğrenme için yaklaşık 3528 görüntü kullanılarak, veri seti içerisinde iniş pisti, araba, uçak ve ağaç nesnelere işaretlenmesi sağlanmıştır. Kullanılan 3528 görüntüden 354’ü test, 705’i doğrulama (validation) ve geriye kalan 2469 görüntü ise eğitim (train) için kullanılmıştır. Şekil 4’te görüldüğü gibi, 3528 görüntünün hepsi için içeriğinde bulunan nesnelere işaretlenmiştir. İşaretleme esnasında iniş pisti; pembe, ağaçlar; yeşil, araba; mor ve uçak; kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 4. RoboFlow üzerinde veri seti oluşturulması.

### 2.3. YOLOv8 ile Nesne Tespiti

YOLO nesne tespiti, nesne sınıflandırma, segmentasyon ve poz tahmininde kullanılan bir algoritmadır. Bu algoritmanın temel çalışma yapısı konvolüsyonel sinir ağlarıdır. “You Only Look Once” açılımının baş harflerinden ismini almaktadır. Bu açılım “Yalnızca Bir Kez Bak” anlamına gelmektedir. Nesne tespitinde kullanılan daha iyi tahmin yapan algoritmalar bulunmaktadır fakat YOLO’yu diğer algoritmalarından ayıran en temel fark hızıdır. YOLO’nun bu kadar hızlı olmasının temel sebebi diğer algoritmalar nesne tespiti yaparken ayrı ayrı CNN sınıflandırıcısı kullanarak işlem sayısını arttırmış ve buna bağlı olarak düşük FPS değerine (Frames per second) yani saniyede alınan kare miktarına sebep olur. YOLO ise nesne tespitini tek bir regresyon problemi olarak ele almaktadır. İşlemi gerçekleştirmek için öncelikle girilen resim karesini NxN boyutunda ızgaralara bölmektedir, ızgara boyutları 4x4, 5x5, 8x8 vs. boyutlarında olabilmektedir. Her ızgara kendi alanında nesne olup olmadığını öncelikle tespit eder daha sonra eğer nesne varsa orta noktasında olup olmadığını tespitini yapar. Eğer nesne ızgaranın orta noktasındaysa, nesnenin uzunluğunu, yüksekliğini ve sınıfının tespitini yapar. YOLO her ızgarada ayrı ayrı tahmin vektörü oluşturmaktadır ve bu tahmin vektörlerinin içinde ızgara içinde nesne olup olmadığından emin olan ve nesne varsa 1 yoksa 0 değerini alan güven skoru bulunur. Ayrıca nesnenin orta noktasının x koordinatını veren Bx, nesnenin orta noktasının y koordinatını veren By, nesne genişliğini veren Bw, nesne yüksekliğini veren Bh değerleri bulunmaktadır. YOLO, YOLOv2, YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 olmak üzere farklı çeşitlere sahiptir. YOLO’nun son zamanlarda en çok kullanılan ve bu çalışmada tercih edilen çeşidi YOLOv8’dir. Bunun sebebi ise gerçek zamanlı nesne tespiti yaparken diğer çeşitlerine göre daha hızlı olmasıdır. Ayrıca YOLOv8 diğer YOLO çeşitlerine göre hız ve doğruluk açısından çok iyi sonuçlar vermektedir. Makine öğrenmesi modellerinde modelleri değerlendirmek için farklı parametreler bulunmaktadır. Kesinlik (precision) pozitif durumun doğru sınıflandırmasını ölçerken, duyarlılık (recall) parametresi gerçek pozitiflerin ne kadar pozitif olduğunu göstermektedir. F1-skor ise kesinlik ve duyarlılık parametrelerinin harmonik ortalamasını gösteren ve uç durumların da dikkate alındığı bir metriktir. mAP parametresi ise ortalama duyarlılık değerini göstermektedir. Bu metriklerden bir diğeri ise model performans değerlendirmeleri için sıklıkla kullanılan karmaşıklık (karışıklık, karışıklık) matrisidir (confusion matrix). Karmaşıklık matrisi, sınıflandırma problemlerinde modellerin başarı durumunu gösteren bir tablodur ve aslında NxN boyutunda bir matristir. Bu matris çok sınıflı problemler açısından oldukça uygun olmakta ve modelin

doğruluğu hakkında bilgiler vermektedir. Karmaşıklık matrisi için köşegen üzerindeki değerlerin yüksek olması model performansı açısından olumlu bir durumdur. Çünkü bunlar modelin doğru tahmin ettiği etiketlerdir. Bu köşegen değerleri dışında kalan değerler ise hata değerleridir. YSA’larda eğitim aşamasında tahmin hatası kayıp (loss) olarak adlandırılır ve önemli bir etmendir. Ağın gradyanlarını hesaplamak amacıyla kayıp fonksiyonları kullanılmakta ve ağırlıklar güncellenmektedir. Başka bir ifade ile kayıp fonksiyonları tahmin değerinin gerçek değerden ne kadar uzak olduğunu ölçmekte yani gerçek ve olası değer arasındaki kaybı göstermektedir [44-46]. Bu çalışmada, iniş pisti tespiti ve analizini yapmak için YOLOv8’de iniş pistine ait havadan çekilmiş fotoğraf kareleri işlenmiştir. YOLOv8 kendisine verilen görüntü karelerini NxN ızgaralara bölmüş ve nesnelerin çevresini renkli sınırlayıcı kutu (bounding box) ile çevrelemiştir. Daha sonra YOLOv8 ile nesne tespiti yapılmış tüm parametreler açısından elde edilen grafikler ve karmaşıklık matrisi bulgular bölümünde verilmiştir.

## 2.4. Nokta Bulutu ile İniş Pisti Analizi

Çalışma kapsamında, PyCharm ortamında Python dili kullanılarak verilen pist görüntülerinin nokta bulutu analizi yapılmıştır. İHA uçuş yaparken, aynı yükseklikten pistin; sağdan, soldan önden ve arkadan gerçek görüntüleri alınmıştır ve alınan bu görüntüler daha sonra nokta bulutu ile derinlik hesaplaması yapmak için kullanılmıştır. Yapılan derinlik hesaplamalarına bağlı olarak pist üzerinde engel olup olmadığı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Pist üzerindeki engel tespit edilmesi durumunda İHA’nın inişini gerçekleştirip gerçekleştirmeyeceğine karar verilebilir. İniş pistinin derinlik analizinin yapılabilmesi için görüntülerin bazı işlemlerden geçmesi gerekmektedir. İşlem basamakları Şekil 5’te verildiği gibidir.



Şekil 5. Görüntü işleme basamakları.

### **Görüntünün alınması**

Öncelikle nokta bulutu yardımıyla işlenmek istenen görüntüler, İHA kamerası ile aynı yükseklikten olacak şekilde pistin sağ, sol, ön ve arka kısmından alınır.

### **Renkli görüntünün gri forma dönüştürülmesi**

Alınan renkli yani RGB ( Red: Kırmızı, Green: Yeşil, Blue: Mavi) formda bulunan görüntü gri forma dönüştürülür. Bu işlemin temel amacı görüntünün sahip olduğu üç kanallı RGB formunun tek kanallı gri forma dönüştürülmesi ve görüntü boyutunun küçültülmesidir. Bu sayede algoritma hızı arttırılmış olur. Gri tonlu görüntüde 256 adet gri değeri bulunur. 0 gri değeri siyahı temsil ederken 255 gri değeri ise beyaza karşılık gelmektedir ve gri tonları bu değerler arasında koyudan açığa doğru değişir.

### **Görüntünün eşiklenmesi**

Eşikleme nesnelerin arka plandan ayrılması işlemidir. Bu sayede görüntü üzerindeki gürültü ve parazitler azalarak nesne daha belirgin bir hale gelmiş olur.

### **Görüntünün filtrelenmesi**

Genellikle görüntüdeki gürültü veya parazitlerin ortadan kaldırılması için yapılmaktadır. Bu işlem sonucunda görüntüden ışık yoğunluğuna veya diğer etkenlere bağlı olarak ortaya çıkan parazitler kaldırılarak fotoğraf yumuşatılır [47-51].

## 3. Bulgular ve Tartışma

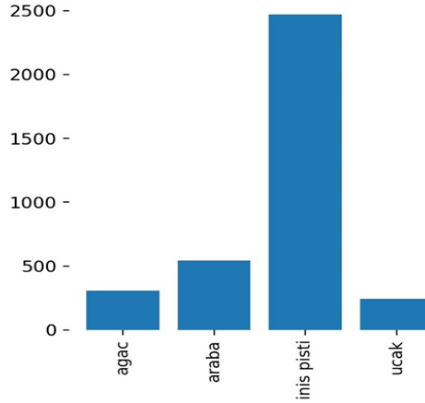
### 3.1. YOLOv8 ile Nesne Tespiti için Elde Edilen Bulgular

Gerçek bir İHA yardımı ile alınan görüntülerden nesne tespitinin yapıldığı ve nokta bulutu ile iniş pistinin analizinin gerçekleştirildiği bu çalışmada, Şekil 6, YOLOv8’den elde edilmiş pist, uçak, araba ve ağaç görüntülerinin işlenmiş ve sınırlayıcı kutu ile işaretlenmiş hallerini göstermektedir. İşaretleme, 0 numaralı sınırlayıcı kutu ağacı, 1 numaralı sınırlayıcı kutu arabayı, 2 numaralı sınırlayıcı kutu iniş pistini ve 3 numaralı sınırlayıcı kutu ise uçağı göstermektedir. Farklı uzaklıktan ve farklı açılardan alınmış gerçek görüntülerin hepsinde iniş pisti, ağaç, araba ve uçak nesnelerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üzerinde engel bulunan pist görüntülerinin tespiti de kolaylıkla yapılmıştır. Şekil 7’de sınıflandırma açısından etiketlenen her sınıf için kaç görüntü bulunduğu verilmiştir. En çok etiketlenme yapılan sınıfın iniş pisti olduğu şekilden açıkça görülmektedir.





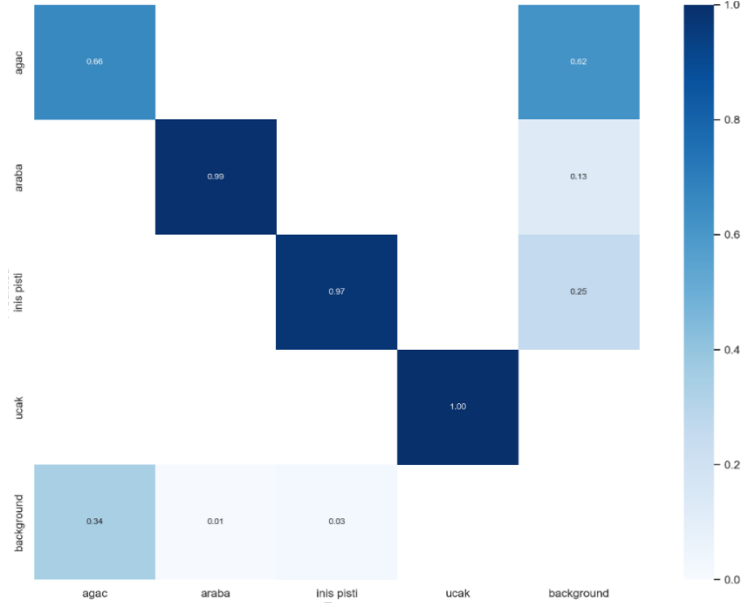
Şekil 6. YOLOv8 ile elde edilen işlenmiş görüntü örnekleri.



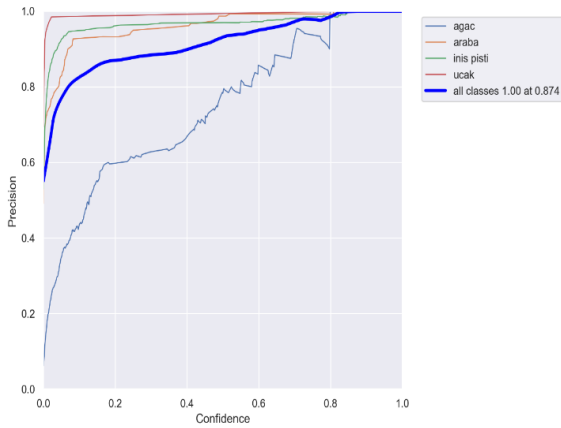
Şekil 7. Tüm sınıflar için etiketlenen görüntü sayısı.

YOLOv8 modelinde işlenen görüntülerden tespit edilmek istenen pist, ağaç, araba ve uçak verilerinin ne kadar doğru tespit edildiği karmaşıklık matrisinde verilmiştir. Bu matris ile veri setinde etiketlenen sınıf ile eğitilen model tarafından tahmin edilen sınıf arasındaki uyum gösterilmektedir. Şekil 8'de verilen karmaşıklık matrisinde işlenmesi için kullanılan görüntülerin doğru ya da yanlış tahminlerinin sayısı tabloda yüzde olarak verilmiş ve bu tabloya bakılarak modelin performansı yorumlanabilmektedir. Algoritmaya verilen ağaçların %66'sının, arabaların neredeyse tamamına yakını olan %99'unun, iniş pistinin %97'sinin ve verilen uçak görüntü karelerinin %100'ünün doğru bir şekilde algılandığı orta kısımdaki kutucuklarda verilmiştir. Alt kısımda verilen kutucuklarda ise görüntülerin algılanamayan yani algoritmanın hata verileri görülmüştür. Bu verilere göre ise verilen ağaç görüntülerinin %34'ünde, arabanın %1'inde ve iniş pistinin %3'ünde hata oluşmuştur. Çizelgenin sağ tarafında verilen renk çizelgesinde ise verilerin oranına göre hangi renkte olacağı tanımlanmıştır. Çizelgenin üst kısmına doğru ilerledikçe renk beyazdan koyu maviye doğru ilerlemekte ve renk koyulaştıkça verinin miktarı artmaktadır.

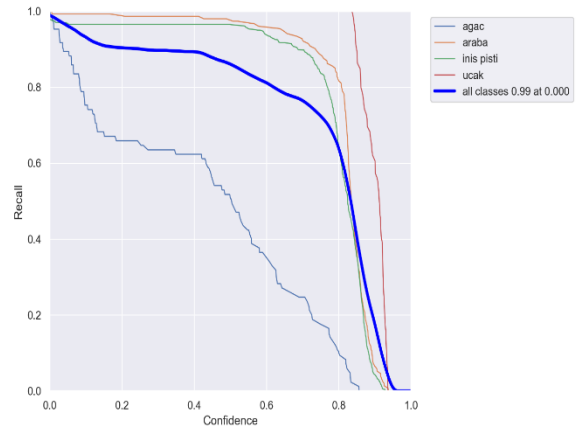
Modelin değerlendirilebilmesi açısından önemli parametrelerden birisi olan kesinlik (precision) değişkeninin grafiği Şekil 9’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde sağa ve üste doğru gittikçe modelin doğruluk oranı artmaktadır. Bu durum yapılan tahminlerin doğruluğunu göstermektedir. Şekillerde koyu-kalın mavi çizgi ile belirtilen değer, tahmin edilen tüm sınıfların ortalamasını vermektedir.



Şekil 8. Karmaşıklık matrisi.



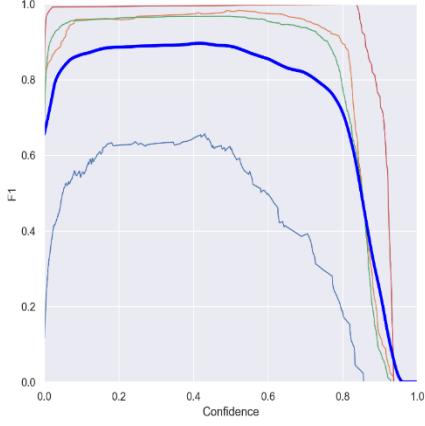
Şekil 9. Kesinlik (Precision) parametresinin değişim grafiği.



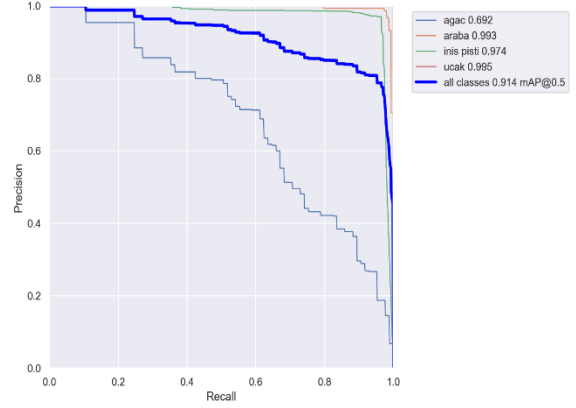
Şekil 10. Duyarlılık (Recall) parametresinin değişim grafiği.

YOLOv8’de oluşturulan modelin duyarlılık (recall) parametresi açısından değişim grafiği Şekil 10’da verilmiştir ve şekilden anlaşıldığı gibi model istenen şekilde çalışarak görevini başarılı olarak yerine getirmiştir. Ayrıca tüm tahminlerin ortalamasını gösteren koyu ve kalın mavi çizginin 0,99 değerine ulaştığı görülmüştür. Bu değer model için oldukça yüksek bir başarı oranıdır. Model performansı açısından en önemli parametrelerden birisi olan ve kesinlik ile duyarlılık parametrelerinin harmonik ortalamasını kullanan F1-skor metriği için değişim grafiği ise Şekil 11’de verilmiştir. Modelin tahmini doğruluk oranını gösteren bu eğri için yine başarılı bir sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, YOLOv8’de nesne tespiti için oluşturulan model performansı

incelendiğinde; bütün parametreler açısından modelin tüm sınıfları ve bu çalışma açısından önem arz eden iniş pistini doğru bir şekilde tespit ettiği görülmüştür. Ayrıca Şekil 12’de verilen kesinlik-duyarlılık grafiğinde %91,4’lük bir mAP değeri ile modelin başarısı ve güvenilirliği ortaya koyulmuştur.

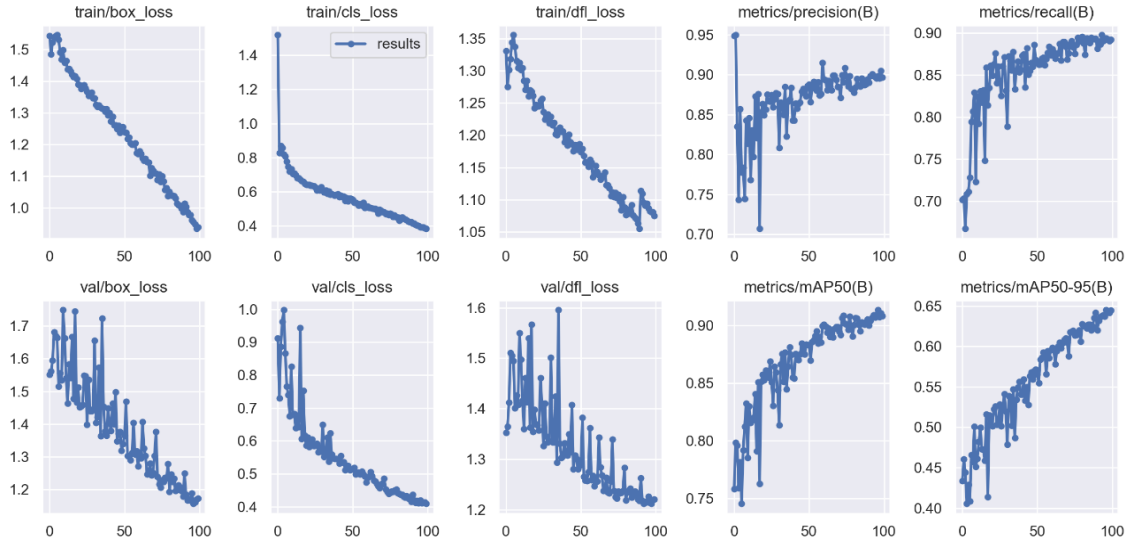


Şekil 11. F1-skor parametresinin değişim grafiği.



Şekil 12. Kesinlik-Duyarlılık grafiği.

Şekil 13’te, önerilen model için kayıp (loss) ve eğitim (train) eğrileri verilmiştir. Kayıp fonksiyonu, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farklı göstermektedir ve değeri ne kadar düşük ise model o kadar iyi öğrenmiş demektir. Şekilde verilen grafiklerde model hızlı bir şekilde öğrenmeye başlamış ve sürekli kayıp değerini azaltmaya yönelik bir durum sergilemiştir. Kesinlik, duyarlılık ve mAP parametrelerine bağlı eğitim grafikleri ise modelin başarı değerleridir ve güven aralığıdır. Bunlar için ulaşılan değerler incelendiğinde ise şekilde görüldüğü gibi modelin ezberlemeden doğru bir öğrenme, tahminleme ve tespit yaptığı belirlenmiştir.

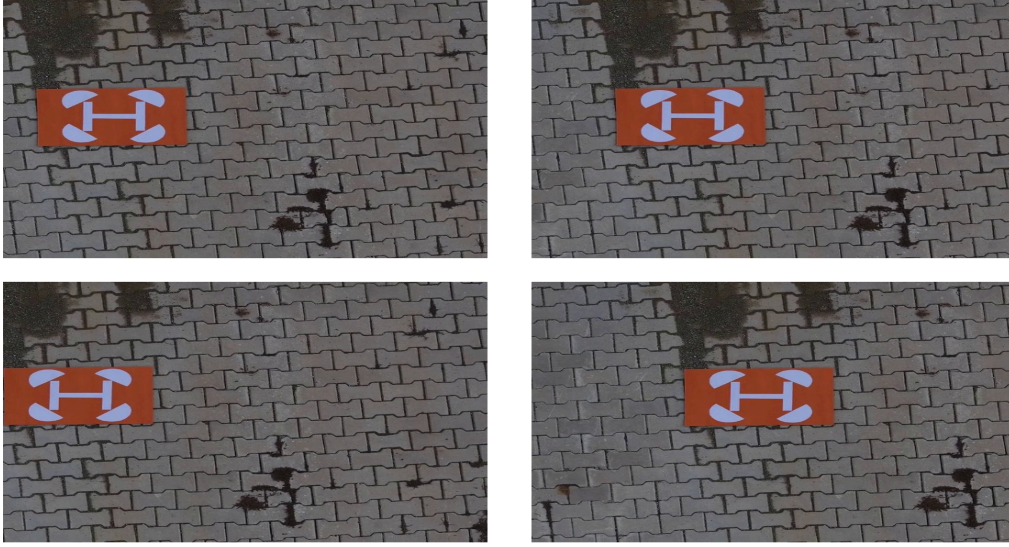


Şekil 13. Önerilen modelin kayıp ve eğitim grafikleri.

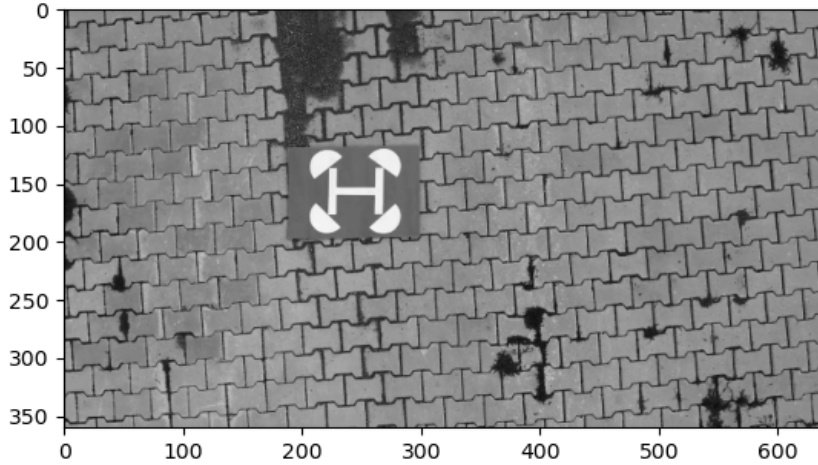
### 3.2. Nokta Bulutu ile İniş Pisti Analizi için Elde Edilen Bulgular

Şekil 14’te üzerinde engel bulunmayan pist görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde ayrıca pistin üzerinde olduğu yolda küçük bir çukur yani derinlik bulunmaktadır. Yolda bulunan bu çukurluk nokta bulutu analizi esnasında derinlik haritası çıkarırken önerilen uygulamanın doğruluğunun gösterilmesi açısından fayda sağlamıştır. Aynı yükseklik için pist; sağ, sol, ön ve arka kısımlardan görüntü alınacak şekilde çekilmiştir.

Görüntüleme işlemi gerçekleştirildikten sonra nokta bulutu formuna dönüştürülmeden önce işlenecek görüntünün kalitesinin artırılması için Şekil 15’de görüldüğü gibi gri forma dönüştürülmüştür.

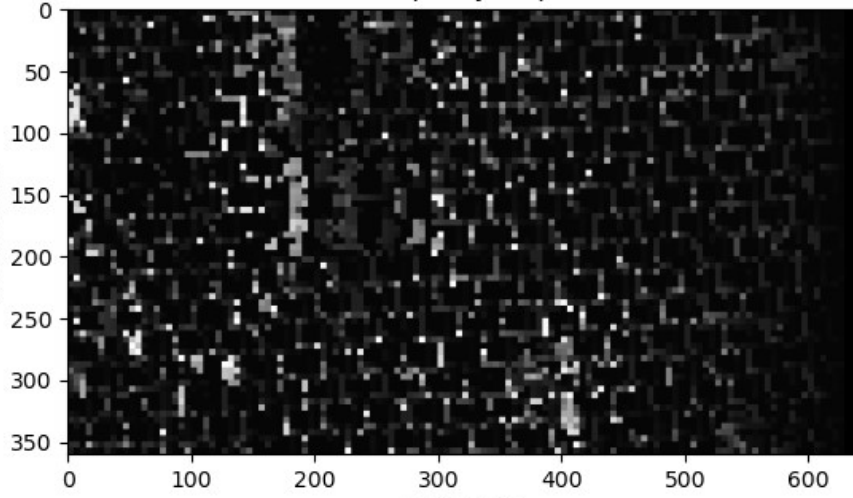


Şekil 14. Nokta bulutu ile pist uygunluk analizi amacıyla kullanılan engelsiz pist görüntüleri.

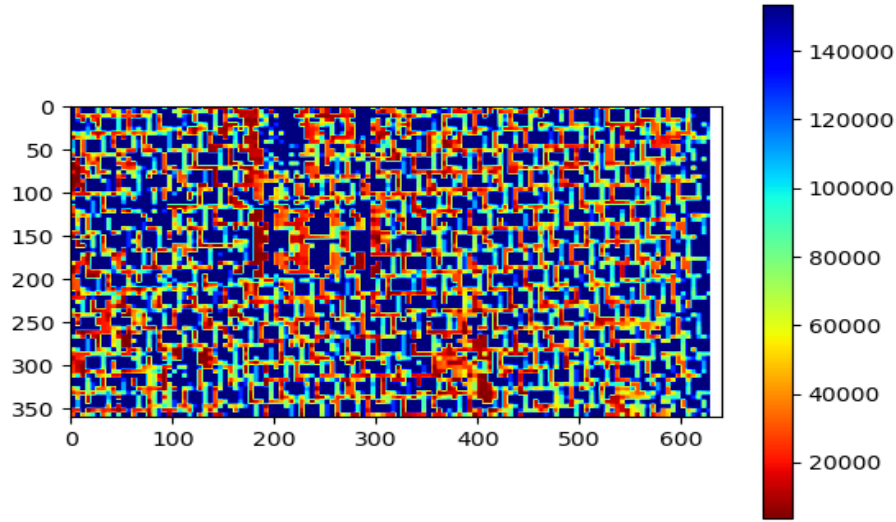


Şekil 15. Gri forma dönüştürülmüş engelsiz pist görüntüsü.

Engelsiz pist görüntüsünde nokta bulutu analizi ile elde edilen siyah-beyaz derinlik haritası Şekil 16’da verilmiştir. Bu harita incelendiğinde pist üzerinde engel bulunmadığı için pist normal bir şekilde görülmüştür. Fakat pistin üst tarafında bulunan çukur kısım bu haritada siyah bir formda görünmekte ve bu durum yapılan derinlik analizinin doğru olduğunu göstermektedir. Şekil 16’da siyah-beyaz formu verilen derinlik haritasının RGB formu Şekil 17’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde pistin üst kısmında bulunan çukurun sahip olduğu derinlik nedeniyle koyu mavi bir renk oluştuğu, pistte ise herhangi bir yükselti ya da derinlik olmadığı için pistin üzerinde bir derinlik algılanmadığı görülmüştür.

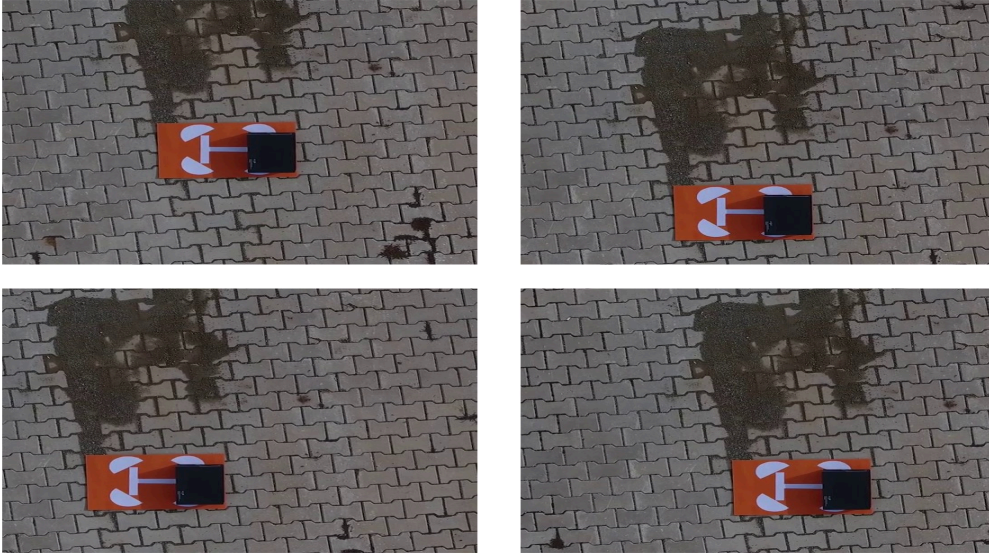


Şekil 16. Engelsiz pist görüntüsü için siyah-beyaz derinlik haritası.

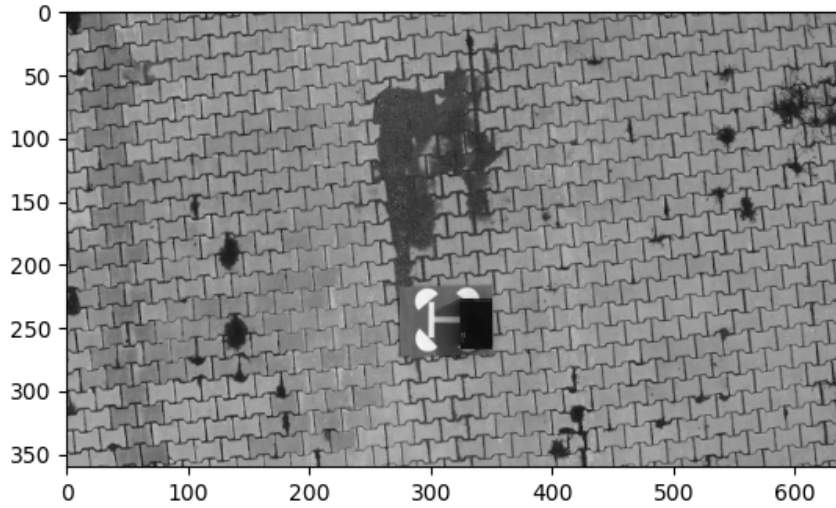


Şekil 17. Engelsiz pist görüntüsü için RGB derinlik haritası.

Bu çalışmada, derinlik haritaları için oluşturulan algoritmada referans alınan RGB derinlik haritasıdır. Bu nedenle renk çizelgesi bu harita için verilmiştir. Siyah-beyaz derinlik haritasında renkler birbirine oldukça yakındır ve bu haritada grinin en koyu tonu RGB haritasında mavi renge an açık ton ise kırmızıya karşılık gelmektedir. Şekil 18'de üzerinde engel bulunan pist görüntüleri verilmiştir. Engel pistin sağ tarafında bulunmaktadır ve engelin fotoğrafa kattığı derinlik haricinde pistin üzerinde olduğu yolda aynı çukur yani derinlik bulunmaktadır. Aynı zamanda pistin yine sabit bir yükseklikten sağ, sol, ön ve arka kısımlarından görüntü alınmıştır. Bu aşama için görüntü elde edildikten sonra nokta bulutu formuna dönüştürülmeden önce işlenecek görüntünün kalitesinin artırılması için Şekil 19'da görüldüğü gibi gri forma dönüştürülmüştür.

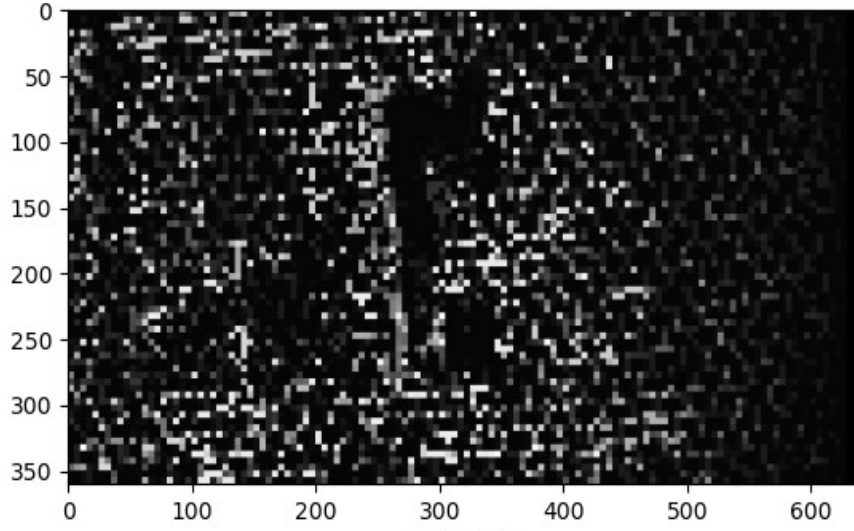


Şekil 18. Nokta bulutu ile pist uygunluk analizi amacıyla kullanılan engelli pist görüntüleri.

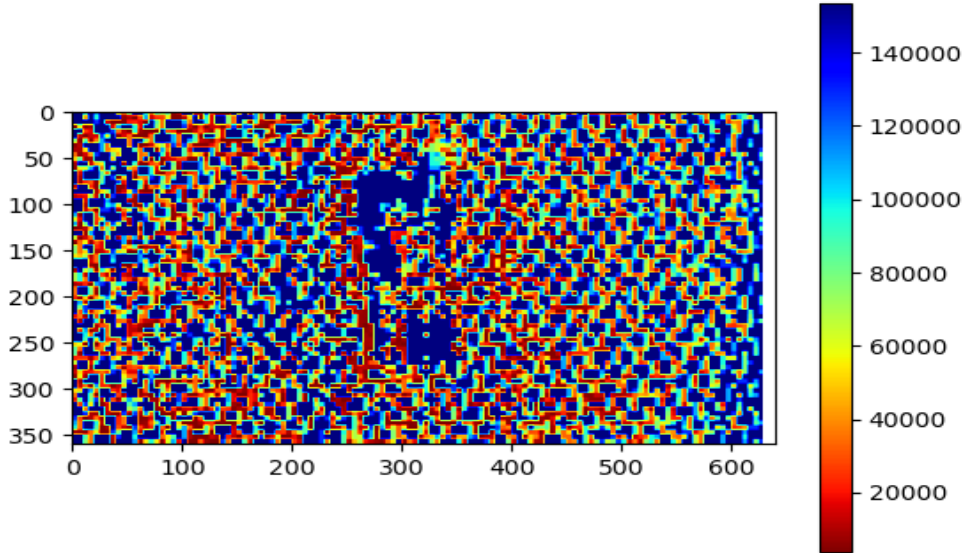


Şekil 19. Gri forma dönüştürülmüş engelli pist görüntüsü.

Gri forma dönüştürülmüş olan görüntünün siyah-beyaz derinlik haritası Şekil 20’de verilmiştir. Bu harita incelendiğinde hem pist üzerinde bulunan engelin hem de pistin üst kısmındaki yolda bulunan çukurun derinliğinin daha fazla olduğu ve o kısımların daha koyu renkli görüldüğü anlaşılmaktadır. Siyah, beyaz formda verilen derinlik haritasının RGB formatı ise Şekil 21’de gösterilmiştir. RGB formatı incelendiğinde ise derinliğin fazla olduğu noktalar mavi renkte, derinliğin az olduğu renkler ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Yani Şekil 20’de siyah renkle görülen ve derinliği olan kısımlar mavi, beyaz renkle görülen kısımlar ise kırmızı rengi almıştır. Arada kalan derinlikler ise kırmızı, mavinin tonlarını ve sarı rengini almıştır. RGB derinlik haritası incelendiğinde de aynı şekilde pist üzerindeki engel ve yolda bulunan çukurun derinliği net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 20. Engelli pist görüntüsü için siyah-beyaz derinlik haritası.



Şekil 21. Engelli pist görüntüsü için RGB derinlik haritası.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Genel yapısı itibarıyla kullanım alanlarına göre farklı donanım ve yazılımlara sahip olan İHA'lar içerisinde bulundukları sensör, kamera gibi aygıtlarla kullanıcıların ihtiyaçlarına cevap vermektelerdir. İHA'lar açısından iniş aşaması ve bu aşamada gerçekleşen kazalar büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, iniş esnasında gerçekleşecek kazaların erken tespiti edilebilmesi ve önlenmesi amacıyla bir uygulama çalışması önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle İHA'lar hakkında genel bilgiler verilerek, avantajlarından, ülkemizdeki ve dünyadaki kullanım durumlarından bahsedilmiştir. Daha sonra dört rotorlu bir İHA kullanılarak gerçek videolar ve görüntüler alınmıştır. İHA'nın kamerasından alınan görüntüler kullanılarak inişini gerçekleştirmesi için tasarlanan pist farklı açı ve yüksekliklerden kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan pist görüntüleri üzerinde RoboFlow uygulaması sayesinde pist, ağaç, uçak ve araba nesnelere etiketlenmiştir. Etiketleme için yaklaşık olarak 3528 görüntü kullanılmış, bu görüntüler eğitim, test ve doğrulama veri kümelerine bölünmüştür. Etiketleme işlemi tamamlanan görüntüler derin öğrenme tabanlı YOLOv8 modeli ile nesne tespiti yapılmıştır. Etiketleme işlemi tamamlanan görüntüler derin öğrenme tabanlı YOLOv8 modeli ile nesne tespiti yapılmıştır. Önerilen YOLOv8 modeli ile nesne tespiti sağlanarak elde edilen görüntülerdeki araba, pist, uçak ve ağaç nesnelere

sınırlayıcı kutular ile gösterilerek model için ortaya çıkan çalışma eğrileri yorumlanmıştır. Keskinlik, duyarlılık ve F1-skor parametreleri için elde edilen grafiksel sonuçlar nesne tespitinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini açıkça göstermiştir.

Günümüzde birçok alanda kullanılan nokta bulutu yöntemi havacılık sektöründe iniş pisti ile ilgili verilerin elde edilmesi için de uygulanabilir düzeydedir. Bu çalışmada da PyCharm ortamında Python dili kullanılarak verilen pist görüntülerinin nokta bulutu yöntemi ile uygunluk analizi yapılmıştır. PyCharm ortamına, pistin üzerinde engel bulunmayan ve bulunan görüntüleri aktarılmış ve engelin bulunduğu görüntülerin derinlik haritaları incelendiğinde engel, görüntü içinde bir derinlik oluşturmuştur. Siyah-beyaz formda ve RGB formunda elde edilen derinlik haritaları sayesinde, uçuşunu tamamlayan İHA'nın inişi için pistin uygunluğu kontrol edilebilir hale gelmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, görüntü işleme ile İHA iniş pisti tespiti sağlandıktan sonra, pistin iniş uygunluğu nokta bulutu verisi kullanılarak analiz edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca görüntü işlemede YOLOv8 kullanılması bu işlemlerin hızını artırarak zamandan tasarruf sağlanmıştır. Bu çalışmada tasarlanan sistem ile İHA'larda iniş aşamasında gerçekleşebilecek kaza oranları düşürülebilir ve oluşabilecek diğer problemler de erken tespit edilebilir düzeye gelmiştir. Gerekli ağlar, öğrenme biçimleri ve uygulamalar kullanılarak İHA'lar için inişin kolay ve kayıpsız bir şekilde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Teknolojik gelişmeler ve bu konuya olan ilginin bu denli fazla olmasından dolayı gelecek yıllarda yapılacak çalışmalarda, İHA sistemleri için sadece iniş anında değil uçuş esnasında ya da otonom iniş-kalkış esnasında bu yöntem kullanılarak daha fazla ilerlemeler sağlanabilir. Farklı kamera tipleri ile farklı yükseklik ve açılardan alınacak görüntüler ile farklı veri setleri oluşturulabilir ve bu veri setleri için de değerlendirmeler yapılabilir. Araştırmamız boyunca edindiğimiz bilgiler ışığında, İHA sistemleri ulaşım, haberleşme, lojistik ve daha birçok alanda derin öğrenme ağlarını kullanarak karşımıza çıkacak gibi durmaktadır. Bu durum da insan kontrolüne olan ihtiyacı azaltma eğilimini göstermektedir. Ayrıca kullanılabilir olan farklı öğrenme katmanlarıyla istenilen her özellik İHA sistemleri ile rahatlıkla bütünleştirilerek öğrenmelerinin gerçekleştirilebilir olmasının diğer farklı gelişmelere öncülük edeceği düşünülmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Mohsan SAH, Othman NQH, Li Y. et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intel Serv Robotics* 2023; 16: 109–137.
- [2] Rolly RM, Malarvezhi P, Lagkas TD. Unmanned aerial vehicles: Applications, techniques, and challenges as aerial base stations. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2022;18(9): doi:10.1177/15501329221123933.
- [3] Mohsan SAH, Khan MA, Noor F, Ullah I, Alsharif M.H, Applications of Unmanned Aerial Vehicles. *Encyclopedia*. Available online: <https://encyclopedia.pub/entry/25512> (accessed on 27 October 2023).
- [4] Shakhateh H, et al., Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. in *IEEE Access*, 2019; 7: 48572-48634, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- [5] Laghari AA, Jumani AK, Laghari L. A, Nawaz H. Unmanned aerial vehicles: A review, *Cognitive Robotics*, 2023; 3: 8-22, ISSN 2667-2413, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>.
- [6] Ahmed F, Mohanta JC, Keshari A, et al. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Arab J Sci. Eng.* 2022; 47: 7963–7984. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06738-0>.
- [7] Karaköse E. Sürü İnsansız Hava Araçlarının Görev Paylaşımı için Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yaklaşım. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Bil. Dergisi*, 2022; 3.
- [8] Zheng X, Hu T. Air2Land: A Deep Learning Dataset for Unmanned Aerial Vehicle Auto Landing from Air to Land. *IET Cyber-Systems and Robotics* 2022; 4 (2): 77-85.
- [9] Wu L, Wang C, Zhang P, Wei C. Deep Reinforcement Learning with Corrective Feedback for Autonomous UAV Landing on a Mobile Platform. *Drones* 2022; 6(238). <https://doi.org/10.3390/drones6090238>.
- [10] Şeker A. Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme, Doktora Semineri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [11] Liao T, Haridevan A, Liu Y, Shan J. Autonomous Vision-Based UAV Landing with Collision Avoidance Using Deep Learning. *Intelligent Computing*. SAI 2022; 507: Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham.
- [12] Wang J, Wei C. A Novel Air-Ground Coordinated Approach for UAV Autonomous Landing on a Mobile Platform. *Proceedings of 2022 International Conference on Autonomous Unmanned Systems ICAUS 2022*: 2033–2043.
- [13] Muraleedharan N, Cohen D. S, et al. Modelling and simulation of UAV systems. In book: *Imaging and Sensing for Unmanned Aircraft Systems*. 2020; 1(5): Control and Performance, 101-121, April 2020.
- [14] Mateja K, Skarka W, Peciak P, Niestroj R, Gude M. Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV, *Energies* 2023; 16(1): 479, <https://doi.org/10.3390/en16010479>.
- [15] Aksu M, Karaköse E. İnsansız Hava Araçlarında Pekiştirmeli Öğrenme Kullanılarak Yükseklik Kontrolü, *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 12 /2022.



- [16] Yaşar S. N, Karaköse E. Trajectory Control of Quadcopter in Matlab Simulation Environment, 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA).
- [17] Karaköse E, Karaköse M, Yilmazer M. Multi-Package Delivery Optimization with Drone, 2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI).
- [18] Neuville R, Bates J.S, Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sens.* 202; 13(352). <https://doi.org/10.3390/rs13030352>.
- [19] Grlj CG, Krznar N, Pranjić M. A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms. *Drones* 2022; 6(17). <https://doi.org/10.3390/drones601001712>.
- [20] Lee JY, Chung AY, Shim H, Joe C, Park S, Kim H. UAV Flight and Landing Guidance System for Emergency Situations. *Sensors* 2019; 19: 4468. <https://doi.org/10.3390/s19204468>.
- [21] Nguyen PH, Kim KW, Lee YW, Park K.R. Remote Marker-Based Tracking for UAV Landing Using Visible-Light Camera Sensor. *Sensors* 2017; 17: 1987. <https://doi.org/10.3390/s17091987>.
- [22] Demirtaş MA. Derin Öğrenme İle 3 Boyutlu Nokta Bulutlarının Sınıflandırılmasına Genel Bir Bakış. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi.* 13 (1): 1 - 9, 30.03.2022.
- [23] Yang T, Li P, Zhang H, Li J, Li Z, Monocular Vision SLAM-Based UAV Autonomous Landing in Emergencies and Unknown Environments. *Electronics* 2018; 7(73).
- [24] Chang CW, Lo LY, Cheung HC, Feng Y, Yang AS, Wen CY, Zhou W. Proactive Guidance for Accurate UAV Landing on a Dynamic Platform: A Visual-Inertial Approach. *Sensors* 2022; 22(404). <https://doi.org/10.3390/s22010404>.
- [25] Ge Z, Jiang J, Pugh E, Marshall B, Yan Y, Sun L. Vision-Based UAV Landing with Guaranteed Reliability in Adverse Environment. *Electronics* 2023; 12(967). <https://doi.org/10.3390/electronics12040967>.
- [26] Xin L, Tang Z, Gai W, Liu H. Vision-Based Autonomous Landing for the UAV: A Review. *Aerospace* 2022; 9(634). <https://doi.org/10.3390/aerospace9110634>
- [27] Fırıldak K, Talu F. Evrişimsel Sinir Ağlarında Kullanılan Transfer Öğrenme Yaklaşımlarının İncelenmesi, *Anatolian Journal of Computer Science*, 2019: 88-95.
- [28] Venugopalan TK, Taher T, Barbastathis G. Autonomous landing of an Unmanned Aerial Vehicle on an Autonomous Marine Vehicle, 2012 Oceans, Hampton Roads, VA, USA, 1-9, doi: 10.1109/OCEANS.2012.6404893.
- [29] Galimov M, Fedorenko R, Klimchik A. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. *Sensors* 2020; 20(3648). <https://doi.org/10.3390/s20133648>.
- [30] Xu R, Liu C, Cao Z, Wang Y, Qian H. A Manipulator-Assisted Multiple UAV Landing System for USV Subject to Disturbance. *Computer Science, Robotics.* 2 Sep 2023.
- [31] Yu L, Luo C, Yu X, Jiang X, Yang E, Lu C, Ren P. Deep Learning For Vision-Based Micro Aerial Vehicle Autonomous Landing, *International Journal of Micro Air Vehicles.* 2018;10(2): 171-185. doi:10.1177/1756829318757470.
- [32] Biçer Y, Moghadam M, et al. Vision-based UAV for Autonomous Landing with Deep Neural Networks, *Session: Learning, Reasoning, and Data Driven Systems I*, Published Online:6 Jan 2019.
- [33] Saygılı Z, Özmen G. İnsansız Hava Araçlarında Gömülü Sistem Üzerinden Derin Öğrenme ile Nesne Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Özel Sayı 34:* 292-298, Mart 2022.
- [34] Usta A, Arserim MA. İnsansız Hava Aracından Çekilen Videolar Kullanılarak Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Nesne Tespiti, *DUJE (Dicle University Journal of Engineering.* 2023; 14(1): 9-15.
- [35] Şin B, Kadioğlu İ. İnsansız Hava Aracı (İHA) ve Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Yabancı Ot Tespitinin Yapılması. *Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü. Turkish Journal of Weed Science* 2019; 20 (2): 211-217.
- [36] Kabadayı A, Erdoğan A, İHA Fotogrametrisi Kullanarak Yozgat Çilekçi Türbesi'nin 3 Boyutlu Nokta Bulutu ve Modelinin Üretilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi,* 2023; 5(1); 29-35.
- [37] Zheng Z, Bewley TR., Kuester F. Point Cloud-Based Target-Oriented 3D Path Planning for UAVs. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Athens, Greece, 2020. 790-798, doi: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213894.
- [38] Han X, Jin J, Wang M, et al. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication.* September 2017; 57: 103-112.
- [39] Wang H, Liu Y, Dong Z, Wang W. You Only Hypothesize Once: Point Cloud Registration with Rotation-equivariant Descriptors. *Computer Science-Computer Vision and Pattern Recognition* 2022.
- [40] Rusu RB, Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011. 1-4, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
- [41] Uray F. Derin Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Hava Lidar Nokta Bulutlarının Sınıflandırılması, *Doktora Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.* 2022.
- [42] Ahmad Fuad N, Yusoff AR, Ismail Z, Majid Z. Comparing The Performance of Point Cloud Registration Methods for Landslide Monitoring Using Mobile Laser Scanning Data, 2018 International Conference on Geomatics and Geospatial Technology, 3-5 September 2018, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [43] Lechner A, Foody G, Boyd D. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth* May 2020; 2(5): 22, 405-412.

- [44] Terven J, Cordava-Esparaza D. A Comprehensive Review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and Beyond, *Computer Science-Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023.
- [45] Diwan T, Anirudh G, Tembhrne J. Object detection using YOLO: Challenges, Architectural Successors, Datasets and Applications. *Multimed Tools Appl*. 2023; 82: 9243–9275. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>.
- [46] Jiang P, Ergu D, Liu F, Cai Y, Ma B. A Review of Yolo Algorithm Developments. *Procedia Computer Science* 2022; 199:1066-1073.
- [47] Kuruvilla J, Sukumaran D, Sankar A, Joy S. A Review on Image Processing and Image Segmentation. *Computer Science 2016 International Conference on Data Mining and Advanced Computing (SAPIENCE)*.
- [48] Solak S, Altınışık U. Görüntü İşleme Teknikleri ve Kümeleme Yöntemleri Kullanılarak Fındık Meyvesinin Tespit ve Sınıflandırılması, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018; 22(1): 56-65,
- [49] Yağmur D, Atalı G. HSL Renk Uzayında Görüntü İşleme ve Morfolojik İşlemler Kullanarak Gerçek Zamanlı Nesne Tespiti ve Sınıflandırması, *European Journal of Science and Technology Special Issue* 28: 607-613, November 2021.
- [50] Çelik A, Tekin E. Hough Transform Görüntü İşleme Yöntemiyle Ekim Makineleri için Tohum Sayma Uygulaması, *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 260-267, Nisan 2020.
- [51] Soyhan İ, Gürel S, Tekin S. Yapay Zeka Tabanlı Görüntü İşleme Tekniklerinin İnsansız Hava Araçları Üzerinde Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı* 24, S. 469-473, Nisan 2021.



## Bellek Tabanlı LSTM ve GRU Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanarak BIST100 Endeks Tahmini

Yusuf ÇELİK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

\*<sup>1</sup> celikyusuf@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 19/12/2023;

Kabul/Accepted: 13/05/2024)

**Öz:** Makine öğrenmesi tabanlı tahmin yaklaşımlarının finansal piyasalarda geliştirilmesi, hızlı ve hassas karar alma, karmaşıklıkla başa çıkma, risk yönetimi, algoritmik ticaret ve duygusal etkilerin azaltılması gibi avantajlar sağlar. Bu yaklaşımlar, sürekli öğrenme ve adaptasyon yetenekleriyle finansal başarı için rekabet avantajı oluşturabilir. Bu makale çalışmada, Borsa İstanbul (BIST) 100 endeks tahmini için bellek tabanlı makine öğrenmesi modellerine dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu amaçla, ardışık veri değerlendirmesinde popüler olan uzun kısa-sürelili bellek (LSTM) ve geçitli tekrarlayan birim (GRU) mimarileri kullanılmıştır. Elde edilen model çıktılarına göre bu modellerin, eğitim ve doğrulama aşamalarında düşük kayıplar gösterdiği ve BIST100 endeksinin genel eğilimlerini başarıyla takip ettiği gözlemlenmiştir. Ancak, modeller piyasa dalgalanmaları ve ani değişimlerde gerçek değerlerden sapmalar göstermiş, bu da belirsizlikleri ve genelleme kapasitelerinin sınırlarını ortaya koymuştur. Geleceğe yönelik tahminler, eğitim veri setindeki desenlere dayanarak yapılmış ancak zamanla artan belirsizlik göstermiştir. Çalışma, makine öğrenmesi algoritmalarının finans verileri üzerindeki kullanım alanı konusunda önemli bilgiler sağlayacak potansiyele sahiptir.

**Anahtar kelimeler:** Makine öğrenmesi, LSTM, GRU, BIST100, finans tahmin.

### Predicting the BIST100 Index Using Memory-Based LSTM and GRU Machine Learning Algorithms

**Abstract:** The development of machine learning-based forecasting approaches in financial markets offers advantages such as rapid and precise decision-making, complexity management, risk mitigation, algorithmic trading, and reduction of emotional biases. These methods can create a competitive edge for financial success through their continuous learning and adaptation capabilities. This article presents a memory-based machine learning approach for predicting the Borsa İstanbul (BIST) 100 index, utilizing popular architectures like Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) for sequential data analysis. The models demonstrated low losses in training and validation phases and successfully followed the general trends of the BIST 100 index. However, they showed deviations from actual values during market volatility, highlighting uncertainties and the limits of their generalization abilities. Predictions were based on patterns in the training dataset but indicated increasing uncertainty over time. This study has the potential to provide significant insights into the application of machine learning algorithms on financial data.

**Key words:** Machine learning, LSTM, GRU, BIST100, financial forecasting.

#### 1. Giriş

Geleneksel makine öğrenme algoritmaları, spesifik ve sınırlı problemleri çözmekte etkili olsa da, karmaşık ve değişken veri yapılarıyla başa çıkmak konusunda sıklıkla zorlanırlar. Bu durum, özellikle sürekli değişen ve çok boyutlu veri setlerini işlemek gerektiğinde daha belirgin hale gelir. Bu noktada, derin öğrenme devreye girer. Yapay sinir ağları modeli üzerine kurulu olan derin öğrenme, verilerin içerdiği karmaşıklığı ve çeşitliliği anlama ve bu bilgileri öğrenme sürecine dahil etme yeteneği sayesinde çok daha geniş bir uygulama alanına sahiptir [1,2]. Derin öğrenme, günümüzde birçok farklı alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır [3-5]. Derin öğrenme yöntemleri zaman serisi problemlerinin analizinde de kullanılmaktadır. Zaman serisi problemleri, geçmiş verilerin zaman içindeki değişimlerini analiz ederek gelecekteki eğilimleri ve desenleri tahmin etmeyi amaçlar. Bu problemlerde kullanılan yaygın yöntemler arasında LSTM ve GRU bulunur. Bu yöntemler, veri setlerindeki uzun vadeli bağımlılıkları ve karmaşıklıkları modellemekte oldukça etkilidir [6]. LSTM ve GRU doğal dil işleme [7], ses tanıma [8] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Finans sektöründe, hisse senetleri, döviz kurları ve piyasa trendleri gibi finansal veriler de zaman serisi verileridir. Finans sektöründe, zaman serisi verileri, piyasa trendleri ve ekonomik göstergeler gibi karmaşık veri setlerinin analizi için derin öğrenme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır [9-11]. Coa ve ark, LSTM modeli,

\* Sorumlu yazar: [celikyusuf@munzur.edu.tr](mailto:celikyusuf@munzur.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7859-7543

CEEMDAN sinyal ayrıştırma algoritması ile birleştirilerek finansal zaman serileri tahmin modeli (CEEMDAN-LSTM) olarak kullanılmıştır. Çalışmalarında büyük borsa endekslerinin (S&P500, HSI, DAX, SSE) günlük kapanış fiyatlarını tahmin etmek için modellerini kullanmışlardır. Makaledeki modelin performansını doğrulamak için LSTM, SVM, CEEMDAN-SVM, CEEMDAN-MLP ve CEEMDAN-LSTM dahil olmak üzere birkaç modelin tahmin etkisi karşılaştırılmıştır [12]. Siami-Namini ve ark. zaman serisi verilerini tahmin etmek için derin öğrenme tabanlı yeni algoritmaların, özellikle LSTM'nin, geleneksel algoritmalara kıyasla önemli ölçüde daha üstün olduğu vurgulanıyor. LSTM, ARIMA modeline göre hata oranlarını %84 ile %87 oranında azaltarak, zaman serisi tahminindeki doğruluk ve hassasiyet konusunda büyük bir gelişme sağlamıştır [13]. Pirani ve ark. yaptığı çalışmada hisse senedi geçmiş verilerinden oluşturulan bir veri seti kullanarak ARIMA, tek yönlü LSTM, çift yönlü LSTM ve GRU modellerinin performanslarını ve eğitim davranışlarını analiz etmiştir. GRU modeli daha hızlı çalışmıştır. Ayrıca tahmin doğruluk oranında da GRU daha iyi performans göstermiştir [14].

Bu çalışmada, BIST100 endeks tahmini için hem LSTM hem de GRU algoritmalarına dayalı modeller kullanılmıştır. Finans verileri tarihsel olarak geniş kapsamlı bir şekilde çeşitli kaynaklardan elde edilmiş ve model girişlerine uygun bir yapıya dönüştürülmüştür. Tahmin aşamasında günlük kapanış bilgileri üzerinde bellek tabanlı modellerin uygulanması gerçekleştirilmiştir. Böylece sonraki kapanış bilgilerinin modeller tarafından otomatik tahmin edilmesi sağlanmıştır.

## 2. Bellek Tabanlı Makine Öğrenme Modelleri

Bellek tabanlı makine öğrenme modelleri, özellikle doğal dil işleme (NLP) alanında kullanılan bir tür makine öğrenme modelidir. Bu modeller, büyük miktarda veriyi öğrenmek ve anlamak için geliştirilen derin öğrenme algoritmalarını temel alır. Bellek tabanlı modeller, uzun vadeli bağımlılıkları ele almak için özel olarak tasarlanmış bir dizi mekanizmayı içerir. Bu mekanizma, geçmişteki bilgileri saklama ve hatırlama yeteneğiyle öne çıkar. LSTM [15] ve GRU [16] gibi mekanizmalar, bu tür modellerde sıkça kullanılan yapılarıdır.

### 2.1. Uzun kısa süreli hafıza (LSTM)

LSTM, Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory) ifadesinin kısaltmasıdır ve derin öğrenme alanında, özellikle zaman serisi verileri ile çalışırken kullanılan bir yapay sinir ağı türüdür. LSTM'ler, tekrarlayan sinir ağları (RNN) sınıfına aittir ve özellikle uzun süreli bağımlılıkları modellemek için tasarlanmıştır. Standart RNN'ler, "vanishing gradient" (kaybolan gradyan) sorunu nedeniyle uzun süreli bağlantıları öğrenmekte zorlanırken, LSTM'ler bu sorunu, hücre durumu ve kapılar adı verilen özel yapılar aracılığıyla aşar. Bu kapılar, ağın bilgiyi ne kadar süre boyunca saklayacağını veya unutacağını kontrol eder, böylece önemli bilgilerin korunmasını ve önemsiz bilgilerin atılmasını sağlar. Bu özellikleri sayesinde, LSTM'ler, dil modelleme, konuşma tanıma, el yazısı tanıma ve karmaşık zaman serisi tahminleri gibi pek çok alanda başarıyla kullanılmaktadır [7,8,17-19]. LSTM'nin ana prensibi, hücre durumunun korunması ve kontrol edilmesidir. Bu durum, yalnızca özel kapılar aracılığıyla bilgi eklenebilir veya çıkarılabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu kapılar, dış etkilerden bağımsız olarak hücre durumunun sabit kalmasını sağlar. Bir LSTM ünitesi genellikle üç ana kapı içerir: unut kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı. Bu kapılar, hücre içindeki bilgi akışını düzenleyerek LSTM'nin zamanla ilgili veri öğrenme yeteneğini artırır [20].

Giriş kapısı, mevcut girdiden hangi bilgilerin hücre durumuna eklenmesi gerektiğini belirler. Denklem 1 ve 2'de giriş kapısına ait matematiksel gösterimler sunulmuştur.

$$i_t = \sigma(x_t U^i + h_{t-1} W^i) \quad (1)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(x_t U^g + h_{t-1} W^g) \quad (2)$$

İlk olarak, giriş kapısı için bir aktivasyon vektörü  $i_t$  hesaplanır. Bu aktivasyon, mevcut girdi ve önceki hücre çıktısının birleşimiyle belirlenen bir ağırlık matrisi ile çarpılır ve sonra bir sigmoid fonksiyonu ( $\sigma$ ) ile 0 ile 1 arasında bir değere dönüştürülür.  $U$  ile  $W$ , sırasıyla girdi ve önceki çıktı için giriş kapısına ait ağırlık matrisleridir.  $\tilde{C}$  mevcut girdinin hücre durumuna potansiyel katkısını temsil eder ve  $\tanh$  fonksiyonu sayesinde bu değerler -1 ile 1 arasında normalleştirilir.

Unut kapısı, geçmiş hücre durumu  $C_{t-1}$ 'den hangi bilgilerin unutulacağını belirler.  $\sigma$  sigmoid fonksiyonudur ve 0 ile 1 arasında değerler alır.  $x_t$  mevcut girdidir.  $h_{t-1}$  ise önceki hücre çıktısıdır.  $U$  ve  $W$  ağırlık matrisleridir. Unut kapısına ait hesaplamalar Denklem 3'de verilmiştir.

$$f_t = \sigma(x_t U^f + h_{t-1} W^f) \quad (3)$$

Çıkış kapısı, sonraki katmana ve hücrenin kendisine gönderilecek çıktıyı belirleyen kapıdır. Denklem 4 ve 5'de çıkış kapısına ait matematiksel gösterimler sunulmuştur.

$$o_t = \sigma(x_t U^o + h_{t-1} W^o) \quad (4)$$

$$h_t = \tanh(C_t) * o_t \quad (5)$$

Bu denklemlerde,  $o_t$  çıkış kapısının aktivasyonu, sigmoid fonksiyonu  $\sigma$  ile hesaplanır. Bu, kapının ne kadar "açık" olduğunu belirler ve böylece çıktının ne kadarının geçeceğini düzenler. Denklemde yer alan  $h_t$  elde edilen hücre çıktısıdır ve bu değer sonraki katmana iletilir. Hücre durumu, uzun süreli hafızayı temsil eder ve geçmiş durum ile mevcut girdinin etkisine göre güncellenir. Denklem 6'da hücre durumunun nasıl güncellendiğini gösteren hesaplamalar verilmiştir.

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (6)$$

Bu denklemde yer alan  $f_t$  unutmaya kapısının çıktısıdır ve geçmiş hücre durumunun hangi kısmının korunacağını belirler.  $i_t$  giriş kapısının çıktısıdır ve mevcut girdinin hücre durumuna hangi kısmının eklenmesi gerektiğini belirler.  $\tilde{C}_t$  mevcut girdinin hücre durumuna potansiyel katkısını temsil eden ve tanh fonksiyonu ile normalleştirilen değerdir [21].

## 2.2. Geçitli tekrarlayan birim (GRU)

Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU), Chung ve arkadaşları tarafından 2014 yılında önerilmiştir [22]. GRU, LSTM'nin kapı yapısını basitleştirerek iki kapılı bir model sunar. Bu kapılar güncelleme ve sıfırlama kapılarıdır [23]. GRU, her bir tekrarlayan birimin farklı zaman ölçeklerine bağlı olarak adaptif bir şekilde bağımlılıkları yakalamasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. LSTM birimine benzer şekilde, GRU'nun da birim içindeki bilgi akışını modüle eden kapı birimleri bulunmaktadır, ancak ayrı hafıza hücrelerine sahip değildir [24]. GRU da LSTM gibi zaman serisi problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

$$z_t = \sigma(x_t U^z + h_{t-1} W^z) \quad (7)$$

Denklem 7, güncelleme kapısının fonksiyonu göstermektedir.  $z_t$  değeri ne kadar yüksekse, o kadar fazla önceki bilgi korunur ve yeni bilgiyle o kadar az güncelleme yapılır. Tersine de geçerlidir:  $z_t$  değeri ne kadar düşükse, o kadar fazla yeni bilgi eklenir ve önceki bilgi o kadar az korunur. Bu işlem, GRU'nun her adımda neyi saklayıp neyi unutacağına karar vermesine olanak tanır ve bu sayede karmaşık veri dizilerini etkili bir şekilde işleyebilir.

Denklem 8, sıfırlama kapısının aktivasyonunu ifade eder. Eğer sıfırlama kapısının aktivasyonu düşükse, geçmiş bilgi büyük ölçüde yok sayılır ve model mevcut girdiye daha fazla odaklanır. Eğer aktivasyon yüksekse, önceki gizli durum yeni girdiyle birleştirilir ve bu, modelin önceki bilgiyi daha fazla korumasını sağlar.

$$r_t = \sigma(x_t U^r + h_{t-1} W^r) \quad (8)$$

$r_t$  sıfırlama kapısının aktivasyonunu ifade eder ve 0 ile 1 arasında bir değer alır.  $\sigma$ , sigmoid fonksiyonudur ve her türlü sayıyı 0 ile 1 arasında bir değere normalleştirir.  $x_t$ , mevcut zaman adımındaki girdidir.  $h_{t-1}$  önceki zaman adımındaki gizli durumdur.  $U$  ile  $W$  mevcut girdi ve önceki gizli duruma uygulanan ağırlık matrisleridir ve model eğitimi sırasında öğrenilir.

$$\tilde{h}_t = \tanh(x_t U^h + (r_t * h_{t-1}) W^h) \quad (9)$$

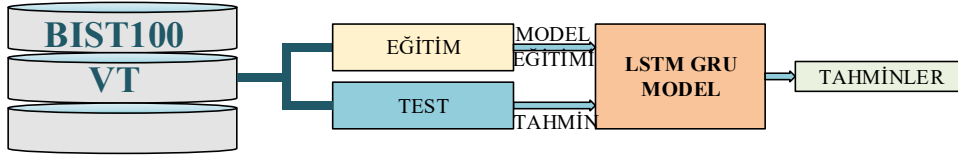
Denklem 9, yeni gizli durumun adayını hesaplama işlemini gösterir. GRU'da yeni gizli durumun adayını, mevcut girdi ve önceki gizli durumun bir kombinasyonu ile hesaplanır.  $\tilde{h}_t$  yeni gizli durumun adayını ifade eder. Bu işlem, sıfırlama kapısının etkisi altında gerçekleşir. Yeni gizli durum adayını, girdi ve önceki gizli durum arasındaki ilişkinin ne kadarının korunacağını belirleyen bir bileşendir.

$$h_t = (1 - z_t) \cdot h_{t-1} + z_t \cdot \tilde{h}_t \quad (10)$$

Denklem 10, yeni gizli durumun nasıl hesaplandığını açıklar.  $h_t$  mevcut zaman adımıdaki yeni gizli durumu ifade eder.  $z_t$  güncelleme kapısının aktivasyonunu ifade eder ve önceki gizli durumun yeni gizli durumla ne kadar güncelleneceğini belirler.  $(1 - z_t)$  önceki gizli durumun korunma miktarını ifade eder.  $\tilde{h}_t$  yeni gizli durum adayını ifade eder. Yeni gizli durum, güncelleme kapısının aktivasyonuna göre önceki gizli durum ile yeni gizli durum adayının birleşiminden oluşur. Bu, GRU hücresinin zaman serisi veri akışında bilgiyi nasıl güncelleyeceğini ve saklayacağını belirler [21]. GRU, mevcut durum ile yeni hesaplanan durum arasında lineer bir toplam alınması süreci açısından LSTM birimine benzerdir. Ancak, GRU'nun durumunun ne dereceye kadar açığa çıkarılacağını kontrol eden bir mekanizması yoktur ve her seferinde tüm durumu açığa çıkarır [24].

### 3. Materyal ve Metot

BIST100 endeksinin geçmiş günlük kapanış değerleri bir veri tabanında toplanmıştır. Bu veri tabanı, farklı tahmin modellerinin uygulanması için temel oluşturmuştur. Söz konusu modeller, piyasanın geçmişteki hareketlerini analiz ederek öğrenme modeli oluşturulmuş daha sonra test verileri üzerinde tahminler elde edilmiştir. Şekil 1'de, BIST100 endeks değerleri tahmininin blok gösterimi sunulmaktadır. Bu gösterimde, veri tabanında (VT) toplanan BIST100 verilerinin eğitim ve test setlerine ayrılması ve bu verilerin LSTM ve GRU modellerine uygulanarak tahminlerin elde edilmesi süreci yer almaktadır.



Şekil 1. BIST100 endeks değerleri tahmini blok gösterimi.

#### 3.1. BIST100 veri seti

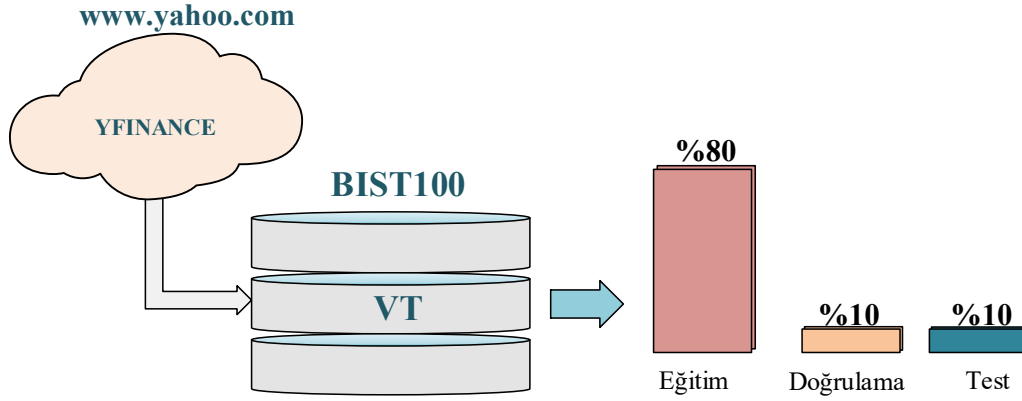
Bu çalışmada, analiz için Borsa İstanbul verileri temel alınmıştır. BIST100 endeksine ait geçmiş veriler, veri setinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Veri seti, Yahoo Finance web servisi tarafından finansal verilerin elde edilmesi için geliştirilen yfinance kütüphanesi aracılığıyla derlenmiştir. BIST100'e ait tüm geçmiş veriler, 1 Temmuz 1997'den 1 Aralık 2023'e kadar olan süreyi kapsayacak şekilde toplanmıştır. yfinance kütüphanesi bu tarihten itibaren BIST100 için veri sağlamaktadır.

Tablo 1. yfinance kütüphanesi aracılığıyla çekilen BIST100 geçmiş verilerine ait örnekler.

Tarih	Açılış	Yüksek	Düşük	Kapanış	Düzeltilmiş K.	Hacim
1997-07-01	1857.0	1864.0	1826.0	1851.0	1851.0	2342600
1997-07-02	1851.0	1877.0	1849.0	1873.0	1873.0	2946200
...	...	...	...	...	...	...
2023-11-29	8115.39	8125.10	7993.10	8009.29	8009.29	2351023100
2023-11-30	8007.79	8049.29	7912.0	7948.60	7948.60	2475424100

Tablo 1, Borsa İstanbul BIST 100 endeksinin yfinance kütüphanesi kullanılarak elde edilen günlük verilerini içermektedir. Bu veriler 1 Temmuz 1997'den itibaren başlamaktadır. Çalışmada BIST 100'ün günlük kapanış fiyatları (close) kullanılmıştır.

13 Haziran 2017'de BIST 100 endeksi 100.000 puan seviyesine ulaşmıştır, 27 Haziran 2020'de endeksin değerlerini uluslararası borsalarla uyumlu hale getirmek amacıyla iki sıfır atılmıştır [25]. Bu değişiklikten dolayı, veri setindeki uyumluluğu sağlamak için 27 Haziran 2020'ye kadar olan veriler 100'e bölünmüştür. Bu işlem, tüm veri setinin birbiriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır.



**Şekil 2.** Veri setinin dağılımı: eğitim için %80 doğrulama için %10 ve test için %10 kullanıldı.

Çalışmadaki toplam veri seti 6600 kayıttan oluşmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği üzere, bu verilerin %80'i (5280 kayıt) eğitim, %10'u (660 kayıt) doğrulama ve %10'u (660 kayıt) test için ayrılmıştır. Test seti için ayrıca, tahminlerin daha doğru yapılabilmesi için önceki 60 günlük veriler de dahil edilmiştir. Bu eklemelerle birlikte, test için kullanılan toplam veri sayısı 720'ye ulaşmıştır. Bu dağılım, veri setinin etkin bir şekilde eğitim, doğrulama ve test amaçları için kullanılmasını sağlamaktadır.

### 3.2. LSTM ve GRU modelleri

Bu çalışmada, BIST 100 endeksi değerlerinin tahmini için derin öğrenme tabanlı iki farklı tekrarlayan sinir ağı modeli incelenmiştir: LSTM ve GRU. Her iki model de zaman serisi verilerinin özelliklerini yakalayabilme ve uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilme kapasiteleri ile seçilmiştir. LSTM modeli, ardışık veri noktaları arasındaki uzun vadeli ilişkileri tanımlamak için tasarlanmış iki katmanlı bir yapı kullanır. Her bir katman, 60 günlük geçmiş verileri temel alarak gelecekteki değerleri tahmin etme üzere eğitilmiştir. GRU modeli ise, benzer şekilde iki katmanlı bir yapıya sahiptir. Her iki modelin ağ mimarisi, BIST 100 endeksi verilerinin zaman içindeki karmaşık desenlerini modelleyebilmek ve tahmin performansını maksimize etme üzere optimize edilmiştir.

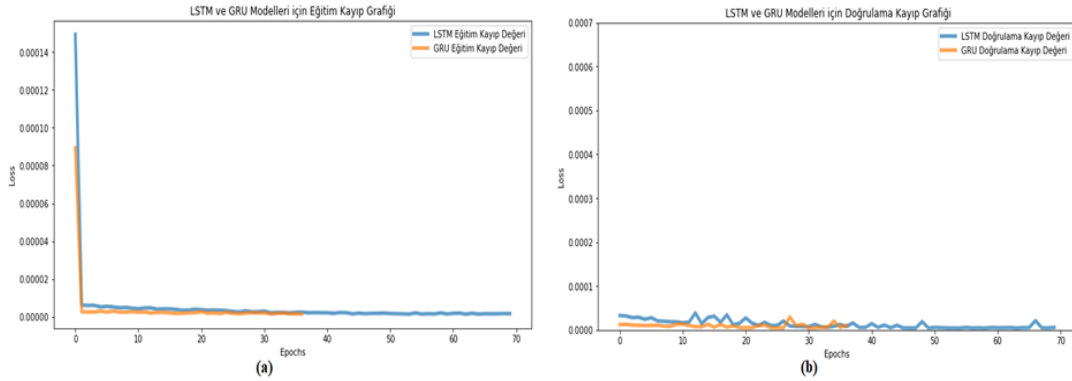
Şekil 3'te BIST 100 endeksi değer tahminleri için kullanılan derin öğrenme modellerinin ağ mimarileri. Şekilde (a) iki GRU katmanı barındıran GRU modeli; (b) iki LSTM katmanı içeren LSTM modeli gösterilmektedir. Her iki model de 60 günlük zaman dilimindeki verileri işleyerek gelecekteki endeks değerlerini tahmin etme üzere eğitilmiştir. Bu süreçte, 60 günlük ardışık veri dizilerini alır ve bu verileri temel alarak 61. gün için BIST 100 endeksinin kapanış değerini tahmin eder. Model eğitimleri sırasında, hem LSTM hem de GRU mimarileri için maksimum 200 epoch belirlenmiştir. Erken durdurma mekanizması (early stopping) devreye alınmış ve doğrulama kaybında iyileşme olmaması durumunda eğitimin durdurulması için sabır (patience) parametresi 6 epoch olarak ayarlanmıştır. Sonuç olarak, GRU modeli 37 epoch ve LSTM modeli ise 70 epoch sonrasında daha fazla iyileşme göstermeyince erken durdurma kriteri tarafından eğitim sonlandırılmıştır.

Şekil 4, LSTM ve GRU modellerinin eğitim sürecindeki performansını kayıp değerleri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. LSTM ve GRU modellerinin eğitim ve doğrulama kayıp değerlerinin epoch boyunca nasıl değiştiğini gösteren iki grafik bulunmaktadır. Şekil 4 (a)'da, her iki modelin eğitim kaybının epoch ilerledikçe benzer bir düşüş trendi gösterdiği ve son derece düşük kayıp değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, modellerin eğitim veri setinden öğrenme sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ve kayıp değerlerinin minimum seviyelere indirildiğini gösterir. Şekil 4 (b)'de, her iki modelin doğrulama seti üzerinde benzer performans sergilediğini ve eğitim süresince istikrarlı bir doğrulama kaybı sergilediğini vurgulamaktadır, bu da öğrenmenin gerçekleştiğini göstermektedir.



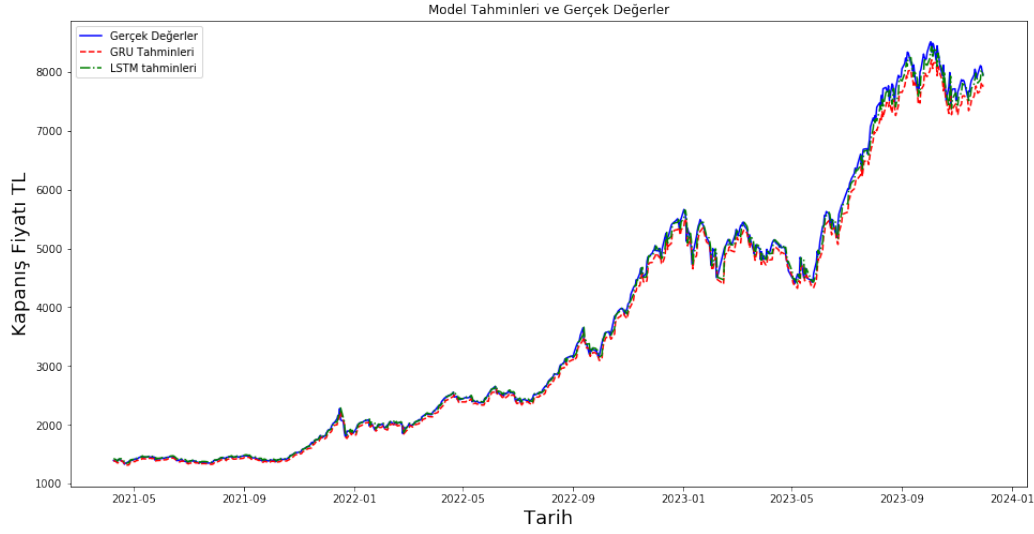


Şekil 3. Tahmin modeli olarak kullanılan ağların mimarisi (a) GRU modeli (b) LSTM modeli.



Şekil 4. LSTM ve GRU modelleri için (a) Eğitim kayıp grafiği (b) Doğrulama kayıp grafiği.

Şekil 5 BIST100 için test veri seti ile LSTM ve GRU modellerin tahminlerini göstermektedir. Mavi renk gerçek değerleri GRU model tahminleri kırmızı renkte kesik çizgili ve LSTM model tahminleri mavi renkte ve noktalı çizgili olarak gösterilmiştir. Grafik, gerçek verilerle model tahminleri arasında yakın uyum olduğunu gösteriyor; her iki modelin tahmin çizgisi de gerçek değerlerin çizgisini genel olarak iyi takip ediyor. Her iki model de veri setinin genel eğilimini ve dalgalanmalarını başarıyla yakalamış. Ancak, özellikle ani değişimlerde, model tahminlerinin gerçek değerlerden biraz sapma gösterdiği noktalar var gibi görünüyor. Bu, modellerin bazı özel durumlarda gerçek değerlerin hassasiyetini tam olarak tahmin edemediğini gösterir.



Şekil 5. Gerçek BIST100 değerleri ile LSTM, GRU tahminleri.

Tablo 2. 30 günlük BIST100 günlük değerleri ile LSTM/GRU Tahminleri Karşılaştırması.

Tarih	Gerçek Değer	LSTM Tahmin	GRU Tahmin
2023-10-20	7510.700195	7669.972168	7565.794922
2023-10-23	7750.399902	7419.475098	7357.185059
2023-10-24	7990.399902	7643.312988	7474.110840
2023-10-25	7425.000000	7930.264160	7698.537109
2023-10-26	7662.100098	7393.363770	7354.715820
2023-10-27	7706.399902	7539.312012	7402.899902
2023-10-30	7712.899902	7630.809570	7470.582520
2023-10-31	7514.100098	7647.412598	7495.452148
2023-11-01	7528.600098	7445.541016	7355.254395
2023-11-02	7663.600098	7433.399902	7319.752930
2023-11-03	7706.000000	7580.813965	7415.254395
2023-11-06	7868.000000	7646.384277	7479.120605
2023-11-07	7844.799805	7804.164062	7609.477539
2023-11-08	7860.899902	7788.689453	7627.725098
2023-11-09	7841.500000	7785.067871	7634.780273
2023-11-10	7771.299805	7759.842773	7620.055664
2023-11-13	7568.299805	7686.708984	7563.953613
2023-11-14	7671.100098	7481.522461	7401.311523
2023-11-15	7665.899902	7569.920410	7429.474121
2023-11-16	7780.700195	7596.593262	7446.645508
2023-11-17	7853.399902	7714.648438	7534.709961
2023-11-20	7946.399902	7797.120117	7613.264648
2023-11-21	8046.600098	7885.582520	7697.936523
2023-11-22	7987.000000	7980.756348	7789.391113
2023-11-23	7898.600098	7918.560059	7767.724121
2023-11-24	7960.000000	7810.809570	7689.947754
2023-11-27	8107.200195	7860.246094	7710.458984
2023-11-28	8093.500000	8021.414551	7828.037109
2023-11-29	8009.299805	8026.615723	7854.217773
2023-11-30	7948.600098	7931.341309	7793.922363

Tablo 2, test sürecinde ele alınan son 30 günlük veri setine ait gerçek değerleri ve bu veriler üzerinde yapılan LSTM ve GRU modellerinin tahmin sonuçlarını içermektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, BIST 100 endeksi üzerinde LSTM ve GRU modelleri kullanılarak yapılan tahminlerin performansı değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, her iki modelin de eğitim ve doğrulama aşamalarında düşük kayıp değerlerine ulaştığını ve gerçek zaman serisi verilerinin genel eğilimlerini yakalayabildiğini göstermektedir. Özellikle, modellerin endeks değerlerinin yükseliş ve düşüşlerini büyük ölçüde takip edebildiği ve uzun vadeli eğilimleri başarıyla modelleyebildiği gözlemlenmiştir. Ancak, tahminlerin gerçek değerlerle tam bir uyum içinde olmadığı ve özellikle piyasa dalgalanmalarının yoğun olduğu dönemlerde gerçek verilerden sapmalar olduğu belirlenmiştir. Bu sapmalar, modellerin ani piyasa hareketlerine karşı duyarlılığının sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Geleceğe yönelik yapılan tahminler, modelin eğitim veri setinde öğrendiği desenlerden yola çıkarak yapılmasına rağmen, tahminlerin zamanla artan bir belirsizlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, modelin gerçek dünya koşullarında karşılaşılabileceği yeni veri noktalarına adaptasyonunun ve genelleme kapasitesinin sınırlarını ortaya koymaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep learning. MIT Press, 2016.
- [2] Sze V, Chen YH, Yang TJ, Emer JS. Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey. *Proc IEEE*, 2017; 105(12): 2295-2329.
- [3] Ozturk T, Talo M, Yildirim EA, Baloglu UB, Yildirim O, Acharya UR. Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. *Comput Biol Med*, 2020; 121: 103792.
- [4] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: *Proc IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit*, 2016; pp. 770-778.
- [5] Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Adv Neural Inf Process Syst*, 2015; 28.
- [6] Huang J, Chai J, Cho S. Deep learning in finance and banking: A literature review and classification. *Front Bus Res China*, 2020; 14(1): 1-24.
- [7] Singh V, Chen SS, Singhania M, Nanavati B, Gupta A. How are reinforcement learning and deep learning algorithms used for big data based decision making in financial industries—A review and research agenda. *Int J Inf Manag Data Insights*, 2022; 2(2): 100094.
- [8] Ahmed S, Alshater MM, El Ammari A, Hammami H. Artificial intelligence and machine learning in finance: A bibliometric review. *Res Int Bus Finance*, 2022; 61: 101646.
- [9] Gamboa JCB. Deep learning for time-series analysis, 2017; arXiv preprint arXiv:1701.01887.
- [10] Sutskever I, Vinyals O, Le QV. Sequence to sequence learning with neural networks. *Adv Neural Inf Process Syst*, 2014; 27.
- [11] Amodei D, Ananthanarayanan S, Anubhai R, Bai J, Battenberg E, Case C, Zhu Z. Deep speech 2: End-to-end speech recognition in English and Mandarin. In: *Int Conf Mach Learn*, 2016; pp. 173-182. PMLR.
- [12] Cao J, Li Z, Li J. Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM. *Physica A*, 2019; 519: 127-139.
- [13] Siami-Namini S, Namin AS. Forecasting economics and financial time series: ARIMA vs. LSTM, 2018; arXiv preprint arXiv:1803.06386.
- [14] Pirani M, Thakkar P, Jivrani P, Bohara MH, Garg D. A comparative analysis of ARIMA, GRU, LSTM and BiLSTM on financial time series forecasting. In: *2022 IEEE Int Conf Distributed Comput Electr Circuits Electron (ICDCECE)*, 2022; pp. 1-6. IEEE.
- [15] Lindemann B, Maschler B, Sahlab N, Weyrich M. A survey on anomaly detection for technical systems using LSTM networks. *Comput Ind*, 2021; 131: 103498.
- [16] Chung J, Gulcehre C, Cho K, Bengio Y. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. 2014; arXiv preprint arXiv:1412.3555.
- [17] Dey R, Salem FM. Gate-variants of gated recurrent unit (GRU) neural networks. In: *2017 IEEE 60th Int Midwest Symp Circuits Syst (MWSCAS)*, 2017; pp. 1597-1600. IEEE.
- [18] Chung J, Gulcehre C, Cho K, Bengio Y. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. 2014; arXiv preprint arXiv:1412.3555.
- [19] Yu Y, Si X, Hu C, Zhang J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures. *Neural Comput*, 2019; 31(7): 1235-1270.
- [20] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Comput*, 1997; 9(8): 1735-1780.
- [21] Cho K, Van Merriënboer B, Gulcehre C, Bahdanau D, Bougares F, Schwenk H, Bengio Y. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation, 2014; arXiv preprint arXiv:1406.1078.

- [22] Merity S, Keskar NS, Socher R. Regularizing and optimizing LSTM language models, 2017; arXiv preprint arXiv:1708.02182.
- [23] Graves A, Jaitly N, Mohamed AR. Hybrid speech recognition with deep bidirectional LSTM. In: 2013 IEEE Workshop Autom Speech Recognit Understanding, 2013; pp. 273-278. IEEE.
- [24] Carbune V, Gonnet P, Deselaers T, Rowley HA, Daryin A, Calvo M, Gervais P. Fast multi-language LSTM-based online handwriting recognition. Int J Document Anal Recognit (IJ DAR), 2020; 23(2): 89-102.
- [25] Wikipedia. (2023, Mayıs 5). Borsa İstanbul. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Borsa\\_İstanbul](https://tr.wikipedia.org/wiki/Borsa_İstanbul)



## Comparing Machine Learning Regression Models for Early-Age Compressive Strength Prediction of Recycled Aggregate Concrete

Muhammed ULUCAN<sup>1\*</sup>, Güngör YILDIRIM<sup>2</sup>, Bilal ALATAŞ<sup>3</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> mulucan@firat.edu.tr, <sup>2</sup> gungor.yildirim@firat.edu.tr, <sup>3</sup> balatas@firat.edu.tr, <sup>4</sup> kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/10/2023;

Kabul/Accepted: 03/07/2024)

**Abstract:** A branch of artificial intelligence called machine learning is well-positioned as a prediction method that can take into consideration several influencing factors and complex inter-factor connections. Without being specifically trained to do so, these machine learning models have the ability to generalize, predict, and learn from data. Regression theory is a key topic in statistical modelling and machine learning. The main goal of this study is to compare the performance of several popular machine learning regression models for predicting the early-age compressive strength of concretes made from recycled concrete aggregates from a structure that demolished following the Sivrice-Elazığ earthquake on January 24, 2020. Early-age concrete compressive strength is even more crucial due to factors like the fact that there are thousands of newly built structures in the aftermath of the earthquake, the quick manufacturing of these structures, and the completion of the project in the lowest amount of time. Determining the early-age concrete strength with high accuracy and in a useful manner is crucial for this reason. Seven different classical machine learning algorithms were employed in this study to achieve all of these goals. Early-age concrete compressive strength values were considered for 1 and 3 days. The relationship between the experimental results and the predicted outcomes of the employed algorithms was investigated, and a thorough comparison of these intelligent regression algorithms was conducted. Within the scope of sustainable development and circular economy goals, it is thought that this article will make significant contributions to the literature in terms of utilizing these waste materials and determining the early-age compressive strengths of the concretes produced with high accuracy.

**Key words:** Compressive strength, Construction and demolition waste, Machine learning, Recycled aggregate concrete.

### Agrega türlerinin ve farklı oranlarda kullanımının geri dönüştürülmüş agrega beton basınç dayanımına etkisinin makine öğrenmesi regresyon modellemesi uyarlanarak değerlendirilmesi

**Öz:** Yapay zekanın makine öğrenimi olarak adlandırılan bir dalı, çeşitli etki faktörlerini ve karmaşık faktörler arası bağlantıları dikkate alabilen bir tahmin yöntemi olarak iyi bir konuma sahiptir. Bu makine öğrenimi modelleri, özel olarak eğitilmeksizin verileri genelleştirme, tahmin etme ve onlardan öğrenme becerisine sahiptir. Regresyon teorisi, istatistiksel modelleme ve makine öğreniminde kilit bir konudur. Bu çalışmanın temel amacı, 24 Ocak 2020'deki Sivrice-Elazığ depreminin ardından yıkılan bir binadan elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarından üretilen betonların erken yaş basınç dayanımını tahmin etmek için birkaç popüler makine öğrenimi regresyon modelinin performansını karşılaştırmaktır. Deprem sonrasında yeni inşa edilen binlerce yapının olması, bu yapıların hızlı bir şekilde imal edilmesi ve projenin en kısa sürede tamamlanması gibi faktörler nedeniyle erken yaş basınç dayanımı daha da büyük önem taşımaktadır. Erken yaş beton dayanımının yüksek doğrulukla ve kullanışlı bir şekilde belirlenmesi bu nedenle çok önemlidir. Bu çalışmada tüm bu hedeflere ulaşmak için yedi farklı klasik makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır. Erken yaş basınç dayanımı değerleri 1 ve 3 gün için dikkate alınmıştır. Deneysel sonuçlar ile kullanılan algoritmaların öngördüğü sonuçlar arasındaki ilişki incelenmiş ve bu akıllı regresyon algoritmalarının kapsamlı bir karşılaştırması yapılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleri kapsamında bu atık malzemelerin değerlendirilmesi ve üretilen betonların erken yaş basınç dayanımlarının yüksek doğrulukla belirlenebilmesi açısından makalenin literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Basınç dayanımı, İnşaat ve yıkıntı atıkları, Makine öğrenme, Geri dönüşüm agregalı beton.

## 1. Introduction

The construction and industrial sector have a very important market worldwide, therefore, it is one of the sectors most affected by sustainability policies. The construction industry consumes approximately 50% of all natural resources and 40% of all energy, in addition to about 50% of all global waste streams [1,2]. In addition, the human population, the urban population, and the consequent increasing need for shelter bring about rapid urbanization and lead to large amounts of consumption. In rapid urbanization, large amounts of concrete are used

\* Sorumlu yazar: [mulucan@firat.edu.tr](mailto:mulucan@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7629-6846, <sup>2</sup> 0000-0002-4096-4838, <sup>3</sup> 0000-0002-3513-0329, <sup>4</sup> 0000-0002-3226-4073,

to construct new buildings and renew old buildings under the name of urban transformation projects. Concrete is the most widely used building material worldwide and consists mainly of cement, aggregate, and water [3,4]. When the basic components of concrete are examined, two main problems are encountered. The first is the environmental pollution caused by cement worldwide, and the second is the trend toward depletion of natural resources in parallel with the increase in concrete use [5-7].

Aggregates constitute 65-70% of the concrete volume and play a major role in the depletion of natural resources due to the increasing use of concrete [8]. This expanding consumption, and waste materials arising from the construction sector have led researchers to different study subjects [9]. Studies on the evaluation of construction and demolition wastes that are damaged or emerged as a result of earthquakes have an important place in this study area. The large amount of waste generated from demolished buildings and the storage of these wastes pose a great threat to the environment [10,11]. For this reason, evaluating these wastes is very important, and studies on the use of these wastes in concrete are becoming increasingly common. The 24 January 2020 Sivrice-Elazig earthquake that occurred in Turkey in recent years can be shown as a great example of this. Elazig and Malatya provinces were affected after the earthquake and the damage was concentrated in Elazig center. Tens of thousands of buildings across Elazig were examined and classified according to their damage status. After this earthquake, thousands of buildings were destroyed, and millions of tons of waste material emerged. Ulucan and Alyamac analyzed a typical building in detail in their study and estimated the approximate total amount of waste generated after the earthquake, taking into account the total number of demolished buildings [12]. In addition, to evaluate these wastes, a detailed laboratory study was carried out using recycled concrete aggregates (RCAs) obtained from a building destroyed after the earthquake on concrete and evaluated the mechanical, environmental, and economic properties of these aggregates. In another study, Ulucan and Alyamac examined in detail the advantages and disadvantages of using RCA in a high-rise building [13]. In their study, Kül et al. aimed to provide a solution for the conversion of construction and demolition waste (CDW) into building materials suitable for accelerated construction and housing in developing countries and disaster-prone areas [14]. Ilcan et al. evaluated the effects of incorporating industrial wastes into CDW-based geopolymer blends [15]. Ozcelikci et al. were developed non-structural ultra-lightweight circular building insulation materials using significant amounts of CDW [16].

Researchers have offered solutions from different perspectives to different problems in order to reduce the negative effects, provide a sustainable life and obtain high-accuracy results. The increasing use of concrete in recent years makes it necessary to determine the quality and different properties of concrete with high accuracy [17,18]. So, it is very important to determine the compressive strength, which is one of concrete's most important mechanical properties, with high accuracy [19]. For this purpose, machine learning algorithms have been widely used in recent years [20]. In their study, Kandiri et al tried to predict the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag by using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm [21]. Zhang et al proposed a method based on machine learning and metaheuristic algorithms to optimize concrete mixing ratios and compared this method with other methods [22]. Golafshani et al. used a multi-layer neural network, a radial basis function neural network and Harris hawks optimization algorithm to develop models that predict the concrete strength of concretes containing supplementary cementitious materials [23]. Tam et al. used artificial neural networks to predict the compressive strength of CO<sub>2</sub> concrete. R square and average error values obtained as a result of this study gave very satisfactory results [24]. Amiri and Hatami used artificial neural networks to predict the mechanical and durability properties of concrete containing slag and RCA [25].

Machine learning, a branch of artificial intelligence, is well-positioned as a prediction method capable of taking into account several determining factors and intricate inter-factor relationships. These machine learning models possess the capacity to generalize, predict, and learn from data without explicitly being programmed to do so. The subject of regression is crucial to statistical modelling and machine learning. It relates to modelling issues when we should predict the values of an additional variable based on the prior values of the predictors, which may contain one or more variables. The main goal of this study is to examine the prediction accuracy of the early-age compressive strength of concretes produced using RCAs obtained from a building that demolished after the 24 January 2020 Sivrice-Elazig earthquake with different machine learning regression models. Early-age concrete strength values of 1 and 3 days, which are of great importance for the rapid construction of the new buildings after the earthquake and the accurate determination of the formwork stripping times, were considered. The relationship between the prediction results of the regression models and the experimental results was examined, and a detailed comparison of these models was made. This study made a comprehensive comparison of different machine learning algorithms that accurately predict the compressive strength of early-age concrete and reduce environmental pollution by using post-earthquake wastes. This paper also contributes to the literature by aiming to utilize waste materials and determine the early-age compressive strength of concrete with high accuracy in the context of sustainable development and circular economy goals. The main contributions of this paper are listed below:

- The effect of aggregate type and its use in different ratios on compressive strength was investigated in detail using intelligent regression models by designing concrete mixtures containing all-natural, all-recyclable and both natural and recycled concrete aggregates.
- The problem of predicting the early age compressive strength of concretes made from RCAs is modelled as a regression problem.
- Instead of a single method, seven different intelligent popular methods were adapted to find solutions for the focused problem. Seven of the most popular machine learning based regression models were applied to achieve better results all together for the first time.

The remaining of this paper is organized as follows. The materials and methods are described in Section 2. The experiments and discussion about the obtained results are presented in Section 3 and the paper is finalized with possible future research directions in Section 4.

## 2. Materials and method

### 2.1. Materials

In this study, CEM 1 42.5 R Portland cement obtained from the Elazig Seza cement factory was used. The chemical compositions of cement are given in Table 1. In order to examine the effect of aggregate type on concrete strength in concrete castings, natural concrete aggregates (NCAs) and RCAs were used. RCAs were obtained from concrete masses that emerged after demolishing a damaged building after the 24 January 2020 Sivrice-Elazig earthquake. Natural aggregates were obtained from the Elazig Çemişgezek region. Aggregates were classified as 0-4 (fine), 4-16 (coarse 1), and 16-31.5 (coarse 2). The experiments carried out in the laboratory to determine the physical properties of these two different aggregate types and the results obtained are given in Table 2. CHRYSO Optima 280-SC3 was used as a water-reducing chemical additive in all concrete mixes.

**Table 1.** Chemical composition of Portland cement

Chemical Properties	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Loss of ignition
Cement	62.48	19.15	4.35	5.50	2.55	0.11	0.45	2.05	-	2.09

**Table 2.** Physical properties of NCA and RCA

Properties	Fine		Coarse 1		Coarse 2	
	NCA	RCA	NCA	RCA	NCA	RCA
Los Angeles abrasion	-	-	-	-	15	23
Specific gravity	2.66	2.48	2.69	2.69	2.71	2.73
Water absorption (%)	1.5	9.8	1.3	4.2	1.2	3.6

### 2.2. Experimental design and preparation of concrete mixtures

Within the scope of this study, a total of 45 different concrete series were produced to examine the effect of aggregate types on concrete strength in detail. Mixture designs consist of all natural aggregate, all recycled aggregate, and concrete mixtures containing both natural and RCA. In this direction, concrete series containing 3 different aggregate designs in addition to 5 different water-to-cement ratios and 3 different cement dosages were prepared. It was expressed as natural aggregate concretes (NAC), recycled aggregate concretes (RAC), and recycled coarse aggregate concretes (RCAC). The prepared concrete series were subjected to compressive strength tests on the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> days, and early-age concrete strengths were obtained. Mixture amounts of these series are given in Table 3.



**Table 3.** Mix proportions of concrete mixtures (kg/m<sup>3</sup>)

Mixture Code	Cement	Water	NCA			RCA			Chemical Additive
			Fine	Coarse 1	Coarse 2	Fine	Coarse 1	Coarse 2	
NAC-1	300	90	642	649	872	-	-	-	7.8
NAC-2	300	105	630	637	855	-	-	-	6.0
NAC-3	300	120	618	625	839	-	-	-	4.2
NAC-4	300	135	606	613	823	-	-	-	3.3
NAC-5	300	150	594	601	807	-	-	-	1.5
NAC-6	350	105	617	624	838	-	-	-	7.7
NAC-7	350	123	603	610	819	-	-	-	5.3
NAC-8	350	140	589	596	800	-	-	-	3.5
NAC-9	350	158	575	582	781	-	-	-	2.5
NAC-10	350	175	561	568	762	-	-	-	1.8
NAC-11	400	120	592	599	805	-	-	-	9.2
NAC-12	400	140	576	583	783	-	-	-	6.8
NAC-13	400	160	560	567	761	-	-	-	4.0
NAC-14	400	180	544	551	740	-	-	-	2.4
NAC-15	400	200	528	534	718	-	-	-	1.2
RAC-1	300	90	-	-	-	598	649	878	7.8
RAC-2	300	105	-	-	-	587	637	862	6.9
RAC-3	300	120	-	-	-	576	625	845	6.0
RAC-4	300	135	-	-	-	565	613	829	3.3
RAC-5	300	150	-	-	-	554	601	813	1.8
RAC-6	350	105	-	-	-	575	624	844	7.0
RAC-7	350	123	-	-	-	562	610	825	5.6
RAC-8	350	140	-	-	-	549	596	806	2.5
RAC-9	350	158	-	-	-	536	582	787	1.4
RAC-10	350	175	-	-	-	523	568	768	1.1
RAC-11	400	120	-	-	-	552	599	811	5.6
RAC-12	400	140	-	-	-	537	583	789	4.0
RAC-13	400	160	-	-	-	522	567	767	2.4
RAC-14	400	180	-	-	-	508	551	745	1.2
RAC-15	400	200	-	-	-	493	534	723	2.8
RCAC-1	300	90	642	-	-	-	649	878	7.5
RCAC-2	300	105	630	-	-	-	637	862	6.0
RCAC-3	300	120	618	-	-	-	625	845	4.8
RCAC-4	300	135	606	-	-	-	613	829	3.8
RCAC-5	300	150	594	-	-	-	601	813	2.7
RCAC-6	350	105	617	-	-	-	624	844	7.0
RCAC-7	350	123	603	-	-	-	610	825	5.6
RCAC-8	350	140	589	-	-	-	596	806	4.2
RCAC-9	350	158	575	-	-	-	582	787	2.8
RCAC-10	350	175	561	-	-	-	568	768	1.8
RCAC-11	400	120	592	-	-	-	599	811	6.0
RCAC-12	400	140	576	-	-	-	583	789	4.4
RCAC-13	400	160	560	-	-	-	567	767	3.2
RCAC-14	400	180	544	-	-	-	551	745	2.0
RCAC-15	400	200	528	-	-	-	534	723	1.2

### 2.3. The Machine Learning Methods Used

There are many machine learning algorithms in the literature today. According to the No Free Lunch Theorem [26], no machine learning (ML) algorithm can guarantee always finding the best solution for all problems. Therefore, in this study, the data obtained from the comprehensive laboratory experiments were analyzed with seven different ML regression algorithms that are well-known in the literature. These are Multiple Linear Regression, Support Vector Regression, Decision Tree Regression, Random Forest Regression, K-nearest neighbor regression and Feed Forward Neural Network Regression. The algorithm selections to be used in the study were chosen to take into account the characteristics of the data set and allow possible linear/nonlinear relationships to be modeled. The inclusion of Multiple Linear Regression serves as a basic foundation for capturing linear relationships between variables. Support Vector Regression expands our modeling capabilities by accommodating both linear and nonlinear models. Decision Tree Regression and Random Forest Regression were chosen to capture nonlinear relationships and complex interactions within the dataset. The ensemble structure of Random Forest helps reduce overfitting and improve generalization. K-nearest neighbor regression was chosen for its ability to capture local patterns, which is particularly valuable in scenarios that emphasize spatial dependencies. The inclusion of Feed Forward Neural Network Regression acknowledges the power of deep learning models in extracting complex, hierarchical features. This choice is especially important when dealing

with data that exhibits complex relationships that cannot be effectively captured by traditional algorithms. This section contains general information about the machine learning algorithms used in the study.

### 2.3.1. Multiple Linear Regression (MLR)

Multi Linear Regression is a statistical method that fits a linear equation for data with one dependent ( $y$ ) and more than one independent variable ( $x$ ) [27]. The basic principle of MLR is to find the weights ( $\beta$ ) of the attributes (independent variables) that minimize the sum of squared errors (SSE) during the training process. During the training process, the estimation ( $\hat{y}_i$ ) made by the MLR for the  $i$ th observation data is calculated by Equation (1). The error for this observation data is  $\varepsilon_i = (\hat{y}_i - y_i)$ . Equation (2) finds the SSE value for  $N$  training data. Minimizing SSE means finding the smallest hyperplane with a vertical offset.

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^{(1)} + \beta_2 x_i^{(2)} + \dots + \beta_m x_i^{(m)}, \quad m: \text{The number of features} \quad (1)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \quad (2)$$

### 2.3.2. Multiple Polynomial Regression (MPR)

MPR is a special type of multiple linear regression. It is a frequently used method for data whose distribution is not completely linear [28]. In this method, the aim is to find a polynomial functional relationship between the independent variables and the dependent variable. As shown in Equation (3), the model can include linear, high-order, and interaction forms of the independent variables. Although the dependent variables are not in linear form in the model, the parameters are in linear form. In addition to the coefficients of the independent variables estimated in this method, the degree of the polynomial is one of the main factors that make the SSE minimum.

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i1}^2 + \beta_4 x_{i2}^2 + \beta_5 x_{i1} x_{i2} + \dots \quad (3)$$

### 2.3.3. Support Vector Regression (SVR)

The general purpose of linear regression methods is to minimize the SSE. Classical linear models are generally not concerned with determining the error level. The SVR method can achieve this using an objective function with a constraint [29]. The main purpose of SVR is to minimize the L2 form of hyperplane coefficients. The constraint of the objective function is that the estimation error remains within a certain margin ( $\varepsilon_{max}$ , maximum error). However, in practice, margin deviation ( $\delta$ ) can also increase the performance of the model. For this reason, margin deviation is usually added to the objective function. The general objective function and constraint function used in SVR are given in Equation (4) and (5). In SVR, it is tried to ensure that according to the values of the hyperparameters  $C$  and  $\varepsilon_{max}$ , the maximum number of training data remains within the margin limits of the hyperplane.

$$\min \left( \frac{1}{2} \|\beta\|^2 + C \sum_{i=1}^N |\delta_i| \right) \quad (4)$$

$$|\hat{y}_i - y_i| < \varepsilon_{max} + |\delta_i| \quad (5)$$

For complex data where linear separation is difficult, the SVR method uses kernel functions. Kernel functions increase the dimension of the input space and help find the most suitable hyperplane in the new dimensions to be formed. Although there are different kernel functions in the literature; Linear, RBF, and Polynomial kernel functions given in Equation (6), (7), and (8) are used in this study.

$$K_{lin}(x_i, x_j) = x_i x_j \quad (6)$$

$$K_{RBF}(x_i, x_j) = \exp\left(-\gamma |x_i - x_j|^2\right) \quad \gamma : \text{the spread of the kernel}, \quad \gamma > 0 \quad (7)$$

$$K_{pol}(x_i, x_j) = (\alpha(x_i x_j) + \tau)^d \quad \alpha: \text{slope } d: \text{polynom degree } \tau: \text{trade-off parameter} \quad (8)$$

### 2.3.4. Decision Tree Regression (DTR)

Decision Tree [30], one of the supervised learning algorithms, is frequently used in both classification and regression problems. The basic principle is to iteratively divide the relevant data set into smaller sub-parts with if-

else rules. In the resulting tree structure, conditions and results are expressed as condition (decision) nodes, and end nodes. The top condition node is called the root node. In DTR, it is important which attribute will be the condition node and how long the tree depth will be. Two basic parameters are taken into account while constructing the regression tree. The first of these is how homogeneous (impurity) the data is in each partition.

In DTR, homogeneity is calculated with the standard deviation. The decision tree is tried to be created to include homogeneous instances of the dependent variable. For this reason, the condition node selection should be made by considering the decrease in standard deviation in each partitioning. For this, the Standard Deviation Reduction (SDR) value, which is dependent on the standard deviation decrease, is taken into account in each segmentation. SDR is the second important parameter in the creation of DTR. The attribute with a high SDR value is selected as the condition node. Equation (9) and (10) show how to calculate the SDR for an attribute. In the equations,  $y$  and  $f$  represent the dependent variable and an attribute of the training data, respectively.  $S(y, f)$ , are the sums of the probabilities of each value of the independent variable multiplied by the dependent-variable-standard-deviation-value calculated with respect to the relevant independent variable.

$$SDR(y, f) = Std(y) - S(y, f) \quad (9)$$

$$S(y, f) = \sum_{c \in f} P(c)S(c) \quad (10)$$

### 2.3.5. Random Forest Regression (RFR)

Overfitting is among the common problems of decision tree algorithms. Random forest algorithms in which more than one decision tree is run can be used to overcome the overfitting problem. With this feature, the random forest algorithm is among a well-known ensemble method in the literature [23]. As shown in Equation (11), for the given feature set  $X$ , the estimate calculated by a random forest regression (RFR) method containing  $T$  DTRs is the average of  $T$  DTRs.

$$RFR_{pred}(X) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T DTR_i(X) \quad (11)$$

### 2.3.6. K-Nearest Neighbours Regression (KNNR)

KNNR [31], a non-parametric technique, uses similarity (distance) information for prediction. The basic principle is to find the similarity (distance) with each data in the data set of the attribute ( $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ) to be estimated. The similarity value of  $X$  with the  $j$ th data can be calculated with the Minkowski distance given in Equation (12). The distance found is called Manhattan distance in case of  $p=1$ , and Euclidean distance in case of  $p=2$ . Then, according to the calculated similarity values, the average of the dependent variables ( $y$ ) of the  $K$  nearest neighbour data gives the prediction value (Equation (13)).

$$Distance = \left[ \sum_{i=1}^m (|x_i - x_i^{(j)}|)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (12)$$

$$KNNR_{pred}(X) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Ng_i^y, \quad Ng \in Neighbours \text{ set} \quad (13)$$

### 2.3.7. Feedforward Neural Network Regression (FFNNR)

Artificial neural networks (ANNs) are a supervised learning method that has been used in the literature for many years. The basic components of ANNs are nodes (neurons) and layers containing nodes. ANNs models may differ according to the type of problem. In other words, different ANNs can contain different numbers of layers and nodes. Nodes can be connected to each other in different ways. ANN models that do not contain a cycle are called Feedforward Neural Networks (FFNNs). An FFNN node multiplies the values from the input attributes or previous layer nodes by weight coefficients ( $w$ ) and calculates their sum. An intercept ( $b$ ) value can be added to this total. Initially,  $w$  and  $b$  values are usually randomly determined. The value obtained as a result of these operations is then transferred to a non-linear function called the activation function (AF,  $\sigma$ ). Since the  $w$  and  $b$  values of the node also determine the output of AF, the behavior of each node in FFNN can be independent and different from each other. This causes the outputs of different nodes to be more dominant for different input values. The purpose of AF is to provide both non-linear and allow the model to be differentiable in order to determine the optimum weight and bias values. The output value ( $n_{out}$ ) of an FFNN node is found by Equation (14).

$$n_{out} = \sigma(b + \sum_{i=1}^m x_i w_i) \quad (14)$$

The main purpose of FFNN is to find the optimum values of  $w$  and  $b$  for each node that will minimize the cost function ( $C_f$ ) of the model. For this, a gradient decent-based optimization process is performed for a certain number of epochs. These operations are called back-propagation. The cost function used for regression in FFNN is as in Equation (15).

$$C_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (15)$$

## 2.4. Data Set and its Characteristics

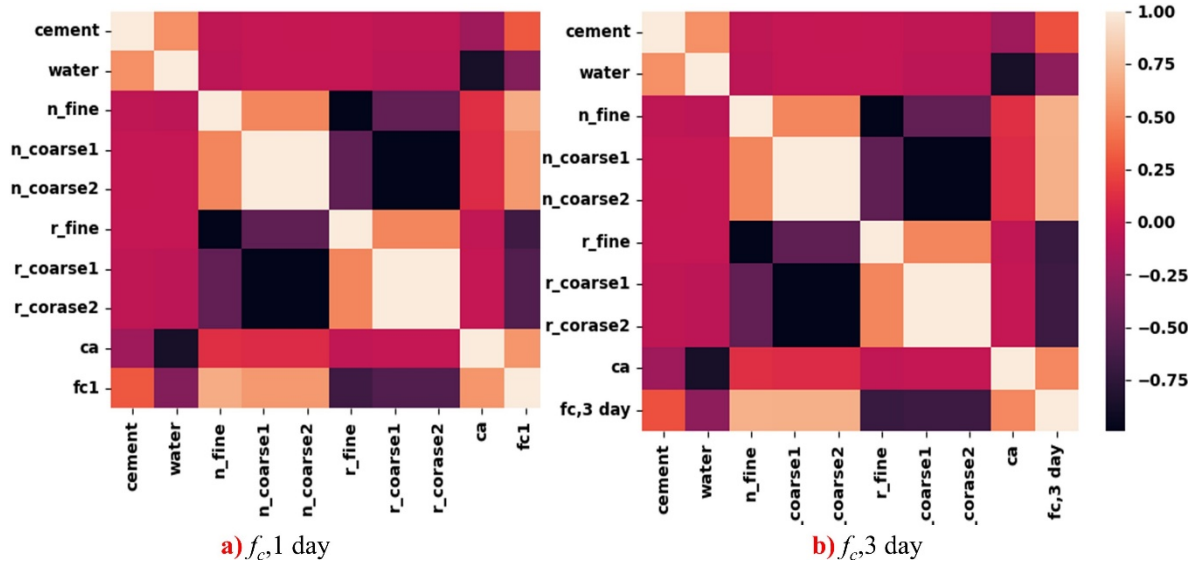
The structure of the data set used for artificial intelligence algorithms and the pre-processing process are important. Numerical, categorical, or ordinal-type values can be found in the data collected in engineering. Most of the time, heterogeneous data types need to be brought into a format that the algorithm to be used will evaluate. In addition, how much all the attributes in a data set affect the regression result is another issue that needs attention. In this section, the details of the data set obtained as a result of the experiments, the pre-processing process of the data set, and the quality analysis will be given. The 9 attributes considered in the data set, and the mixture amounts of these attributes are given in Table 3. Compressive strength tests were applied on the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> days of the concrete series prepared considering these mixing ratios, and the obtained strength values are given in Table 4. The designed laboratory studies contain 135 data for 9 attributes and each response value ( $f_c,1$  day and  $f_c,3$  days). The heatmaps showing the correlation relationship of the considered attributes are presented in Figure 1. Correlation relations of the attributes are given for  $f_c,1$  day in Figure 1.a and  $f_c,3$  days in Figure 1.b. Figures 1.a and 1.b clearly showed similar results. Figure 1.a pointed out that there was a negative correlation between  $f_c,1$  day, and recycled fine, coarse 1, and coarse 2. The main reason for this situation was that RCAs have high water absorption capacity and low specific gravity values. The relationship between aggregates revealed a negative correlation between natural and recycled fine. For the natural fine used in this study, the water absorption was 1.5%, and the specific gravity value was 2.66 g/cm<sup>3</sup>, while these values were 9.8% and 2.48 g/cm<sup>3</sup> for recycled fine, respectively. Thus, the study's use of natural fine as fine aggregate showed positive effects on strength values. When the relationship between  $f_c,3$  days, and natural fine, coarse 1, and coarse 2 was examined, it was seen that there was a correlation of approximately 0.75. As the use of natural aggregate increased in the study, the increase in strength values confirmed this result. Again, Figure 1.b showed a negative correlation between natural coarse 1-2 and recycled coarse 1-2. The mortar on the surface of the recycled aggregate caused low mechanical properties. Since all of the basic input attributes used in this study are numeric, no encoding was needed. However, since algorithms such as SVR and FNNR are sensitive to scale differences between attribute values, it is necessary to use normalized values. For this reason, both normalized and real-valued forms of the data set were used in the experiments. 70% of the data set was used for training and 30% for test data.

## 3. Experiments

In this study, " $f_c,1$ " and " $f_c,3$ " values were tried to be estimated according to the relevant input attributes. For this, seven different machine learning algorithms were used. Although there are different metrics for the evaluation of the regression results, R-squared ( $R^2$ ) and Mean Squared Error (MSE), which are frequently used in the literature, were taken into account in this study.  $R^2$ , given in Equation (16), which is stronger against outliers, gives an idea about the variance ratio for the dependent variable. As can be seen from Equation (17), MSE shows the mean squared difference between the prediction and the true value.

**Table 4.** The features in the data set and response values

Mixture Code	$f_{c,1 \text{ day}}$			$f_{c,3 \text{ days}}$		
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 1	Sample 2	Sample 3
NAC-1	33.2	33.9	34.2	39.8	40.1	40.2
NAC-2	30.9	30.4	30.0	37.0	36.7	37.0
NAC-3	25.2	25.9	25.7	33.7	34.5	33.8
NAC-4	20.7	20.7	21.1	28.6	28.8	29.1
NAC-5	17.2	17.2	17.4	24.2	24.6	24.8
NAC-6	36.4	36.6	36.7	43.3	44.0	43.3
NAC-7	33.2	33.1	33.5	40.3	40.4	40.6
NAC-8	28.7	29.0	28.7	37.1	37.5	37.3
NAC-9	25.0	24.8	24.9	33.1	34.0	33.5
NAC-10	19.3	19.7	20.7	27.7	28.5	28.7
NAC-11	39.5	40.0	39.8	46.5	46.9	46.9
NAC-12	36.5	36.3	36.1	44.1	43.5	44.0
NAC-13	32.8	32.9	32.4	41.8	41.1	41.5
NAC-14	28.5	28.1	28.4	37.1	37.3	36.6
NAC-15	23.7	24.4	24.3	33.0	32.3	33.2
RAC-1	19.1	18.6	18.3	23.4	23.5	23.5
RAC-2	16.5	16.1	16.9	21.6	21.3	21.2
RAC-3	14.1	14.6	14.9	19.8	19.9	20.3
RAC-4	12.3	12.6	13.0	17.5	17.5	17.9
RAC-5	10.6	10.1	10.4	14.7	14.2	14.8
RAC-6	21.9	21.2	21.1	25.8	25.9	25.4
RAC-7	18.3	17.6	18.3	23.0	22.8	23.3
RAC-8	16.1	15.7	15.6	20.0	19.8	20.4
RAC-9	13.8	13.9	14.3	18.9	18.7	18.4
RAC-10	12.0	12.6	11.7	16.9	17.1	17.1
RAC-11	23.4	23.3	24.0	28.3	28.1	28.6
RAC-12	20.4	20.5	20.0	24.9	24.1	24.2
RAC-13	18.0	17.8	17.9	22.8	22.2	22.9
RAC-14	15.1	15.8	15.6	20.0	20.3	20.7
RAC-15	13.6	13.5	13.9	18.7	18.8	18.1
RCAC-1	25.5	25.3	24.8	31.4	32.1	31.2
RCAC-2	23.3	23.4	23.1	28.9	28.2	28.6
RCAC-3	21.1	21.1	20.9	26.4	26.7	26.0
RCAC-4	19.6	19.6	19.0	24.8	24.2	24.3
RCAC-5	17.7	17.8	17.5	21.7	22.3	21.9
RCAC-6	29.3	29.4	29.2	34.8	34.9	34.1
RCAC-7	26.9	26.2	26.8	31.5	31.1	31.9
RCAC-8	23.9	23.2	23.5	28.6	28.6	29.0
RCAC-9	21.7	21.2	21.3	26.1	26.4	26.1
RCAC-10	19.5	19.3	19.2	23.7	23.8	23.5
RCAC-11	32.5	32.1	32.6	37.5	37.0	37.2
RCAC-12	29.9	29.9	29.1	34.5	34.4	34.4
RCAC-13	26.1	26.8	26.4	31.8	31.2	31.0
RCAC-14	23.3	23.6	23.3	28.3	28.2	27.9
RCAC-15	21.3	21.4	21.2	25.4	25.5	25.2



**Figure 1.** The heatmap of the data set according to  $f_c,1$  day and  $f_c,3$  days

In the equations;  $y$ ,  $\hat{y}$ ,  $\bar{y}$ , and  $N$  represent the true value, the prediction, the true value mean, and the total number of data in the data set, respectively. A high (close to 1)  $R^2$  and low MSE value shows high model performance. In general, a good regression model should aim for a high  $R^2$  (indicating a good proportion of explained variance) and a low MSE (indicating accurate predictions). A high (close to 1)  $R^2$  and low (close to 1) MSE value shows high model performance. A higher  $R^2$  suggests a better-fitting model, but a high  $R^2$  alone does not guarantee a model's correctness or practical significance. On the other hand, MSE is a useful metric for assessing the overall accuracy of the model. When these two metrics are evaluated together, a more objective assessment can be made. In addition, the correlation between the prediction results and the actual results is also discussed in the experimental results.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (17)$$

### 3.1. MLR Experiments

The first ML algorithm used is MLR. Figure 2 shows the model developed using MLR and the effects of the parameters used in the model on the compressive strength. Since the main purpose of the study is to examine the effects of RCAs, only the effects of RCAs are given as variables in the figures. For example, Figure 2.a shows the effect of fine RCA on the strength values and the relationship between the actual values and the predicted values. Similarly, Figure 2.d shows the effect of fine RCA on  $f_c,3$  days. Figure 2.g and 2.h show the correlation between actual and predicted values in MLR analyses for  $f_c,1$  day, and  $f_c,3$  days. On the lower right side of Figure 2, the  $R^2$  and MSE values of the model and parameters are given in detail. In MLR analyses for  $f_c,1$  day  $R^2$  and MSE were 0.970 and 1.763, respectively, while the values of these metrics for  $f_c,3$  days data were 0.984 and 1.119, respectively. MLR was succeeded in obtaining successful results in both datasets. The correlation value between actual values and estimates is 0.985 for  $f_c,1$  day and 0.993 for  $f_c,3$  days. Detailed evaluation of MLR performance together with other methods will be presented in the discussion section.

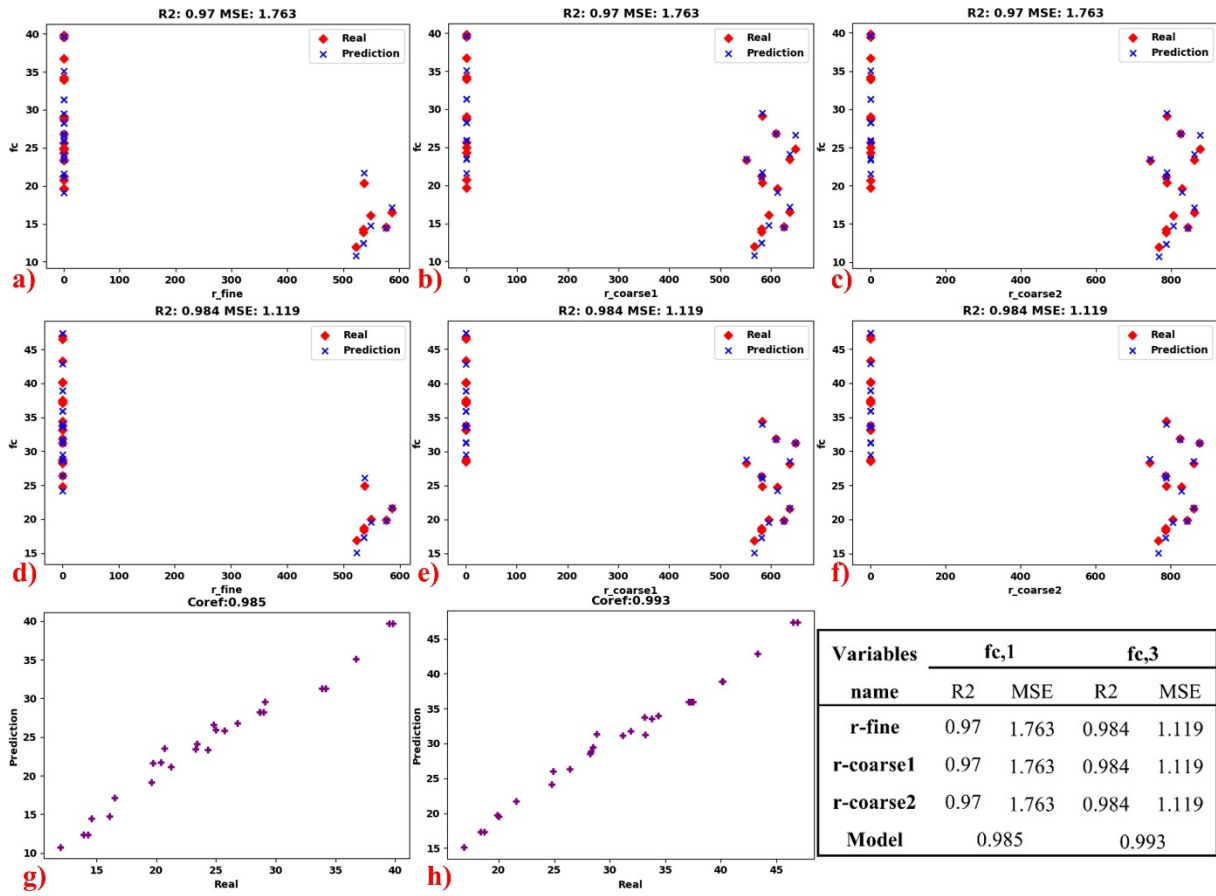


Figure 2. Prediction results on compressive strength of models and parameters developed using MLR.

### 3.2. Polynomial Regression Experiments

The second ML algorithm used is polynomial regression analysis. While performing the polynomial regression analysis, the best result was tried to be achieved by using different polynomial degrees.  $R^2$  and MSE results obtained for degrees from 1 to 8 are shared in Table 5.

Table 5. Polynomial regression analysis results for different polynomial degrees

Class		Degree							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{c,1}$ day	$R^2$	0.970	0.982	0.993	0.997	0.997	>> -1000	>> -1000	>> -1000
	MSE	1.763	1.047	0.429	0.170	0.171	654	929	973
$f_{c,3}$ days	$R^2$	0.984	0.998	0.997	0.998	0.998	>> -1000	>> -1000	>> -1000
	MSE	1.119	0.174	0.203	0.148	0.149	>> 1000	>> 1000	>> 1000

### 3.3. SVR Experiments

The third ML algorithm used is the SVR method. Three types of estimation algorithms, linear, polynomial and RBF regression, were used while performing this analysis. Normalized values of data sets were used in the analysis. The  $R^2$  and MSE values obtained as a result of the analyses are given in Table 6. The best  $R^2$  and MSE values for both datasets were obtained with SVR using the polynomial kernel function, albeit with a small difference. The metric values of  $f_c$  for 1 day are 0.995 and 0.005, respectively, while  $f_c$  is 0.998 and 0.003 for 3 days. The lowest performance for both datasets was obtained in SVR using the linear kernel. Figure 4 shows the detailed prediction results on the compressive strength of the model developed using the SVR method and the parameters used in the model.

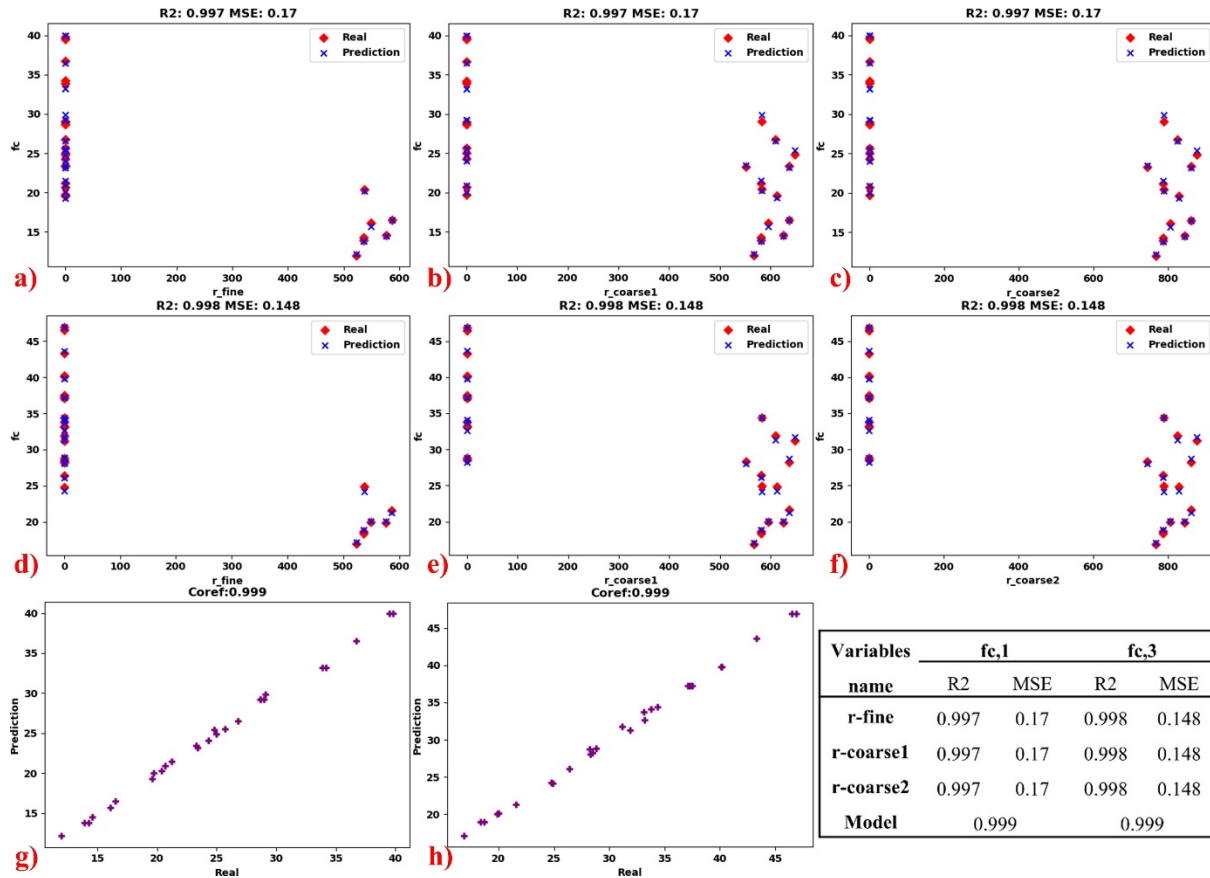


Figure 3. Prediction results on compressive strength of model developed using polynomial regression and the relevant parameters.

Table 6. SVR regression analysis results for different kernels

Class	Kernel	R <sup>2</sup>	MSE
f <sub>c,1</sub> day	Linear	0.970	0.034
	Polynomial	0.995	0.005
	RBF	0.995	0.006
f <sub>c,3</sub> days	Linear	0.985	0.003
	Polynomial	0.998	0.003
	RBF	0.996	0.003

### 3.4. DTR Experiments

The fourth ML algorithm used is the DTR method. Looking at the graphs of data set attributes and prediction results given in Figure 5, it is seen that the error increases even more in predictions where the true value is greater than 25. In particular, the prediction errors between 25-35 were higher.



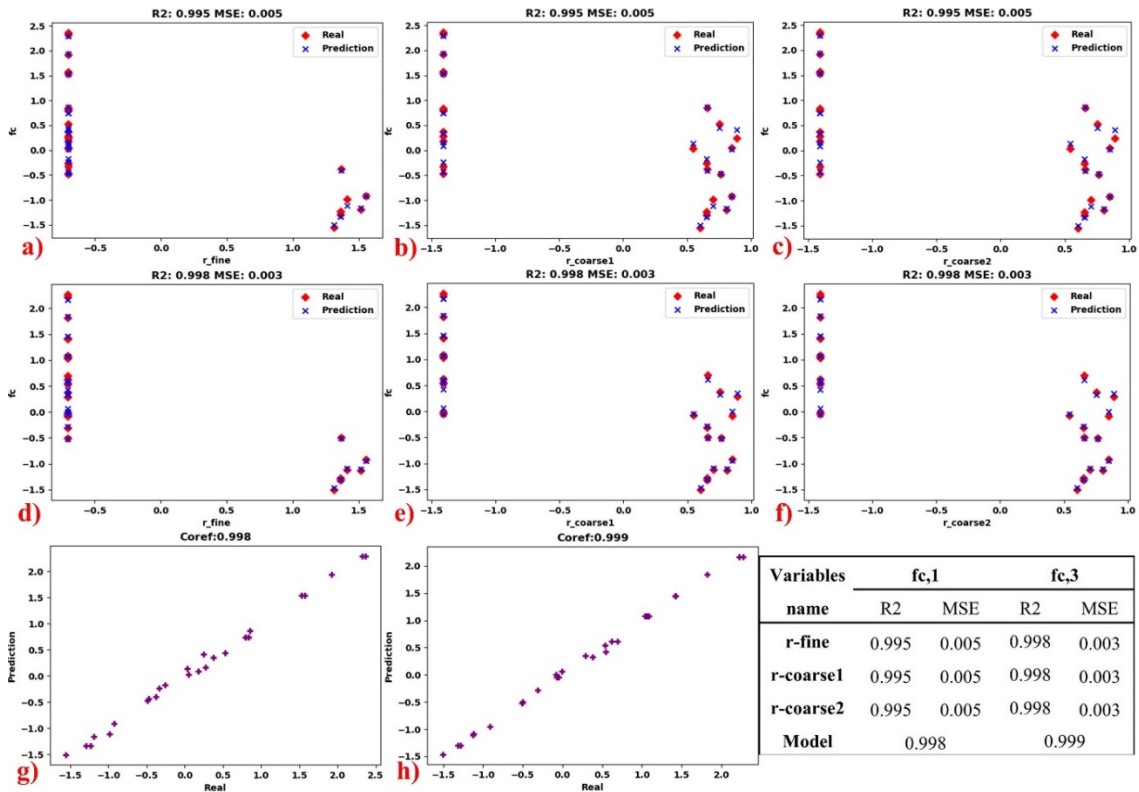


Figure 4. Compressive strength prediction results of models developed with SVR algorithm and its parameters.

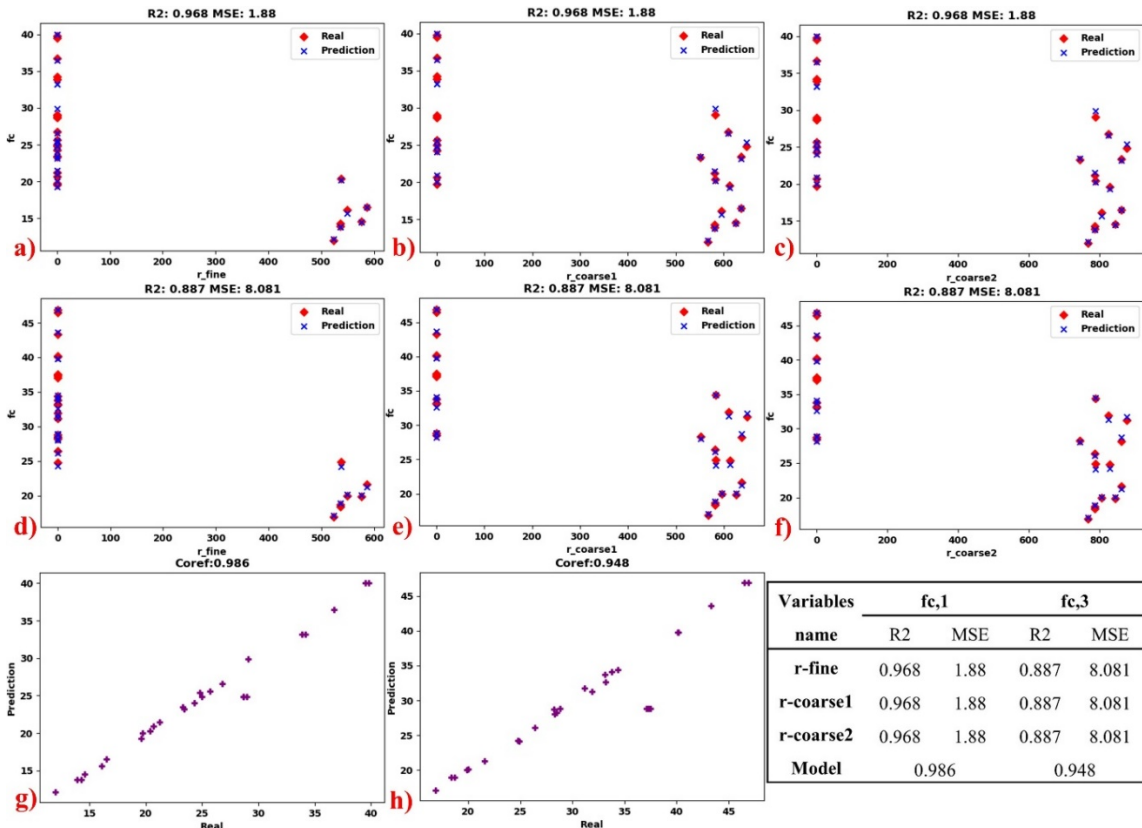


Figure 5. Compressive strength prediction results of models developed with DTR algorithm and its parameters.

### 3.5. RFR Experiments

In the predictions using the RF method, firstly, experiments were carried out for different tree numbers and the effect of the number of trees on the prediction results was examined. The metric results obtained are shared in Table 7. The increase in the number of trees was not a factor in increasing the performance. The best  $R^2$  and MSE values for  $f_c$ , 1-day data were 0.916 and 4.891, respectively, and these values were obtained in the 2-tree RFR model. For these data, the increase in the number of trees affected the performance negatively. The best  $R^2$  and MSE values in experiments for  $f_c$ , 3 days were 0.975 and 1.805, respectively. These results were captured with the 10-tree RFR model.

Table 7. RFR regression analysis results for different tree numbers

		Tree Number					
Class		2	3	5	10	20	30
$f_c$ , 1 day	$R^2$	0.916	0.870	0.908	0.891	0.893	0.910
	MSE	4.891	7.885	5.375	6.355	6.255	5.26
$f_c$ , 3 days	$R^2$	0.932	0.911	0.951	0.975	0.937	0.949
	MSE	4.869	6.309	3.474	1.805	4.476	3.66

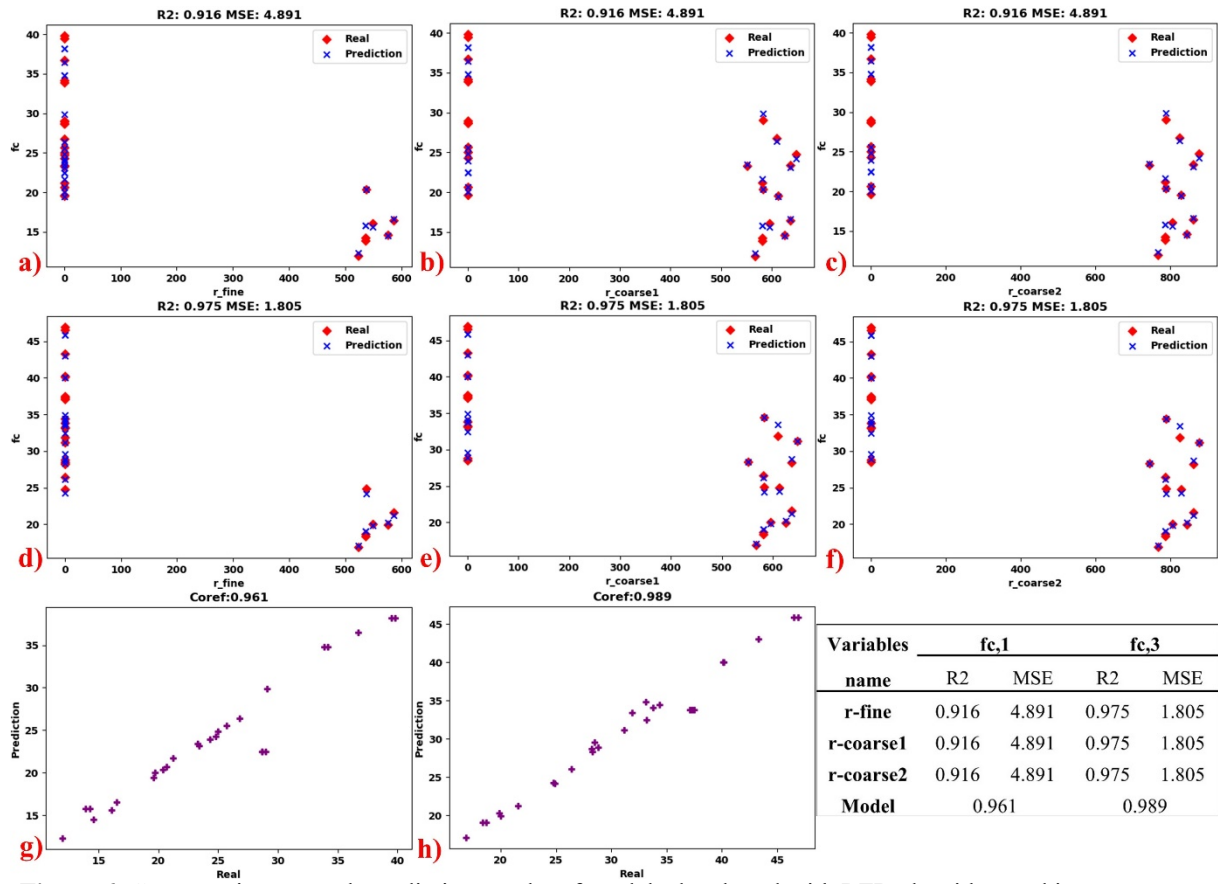


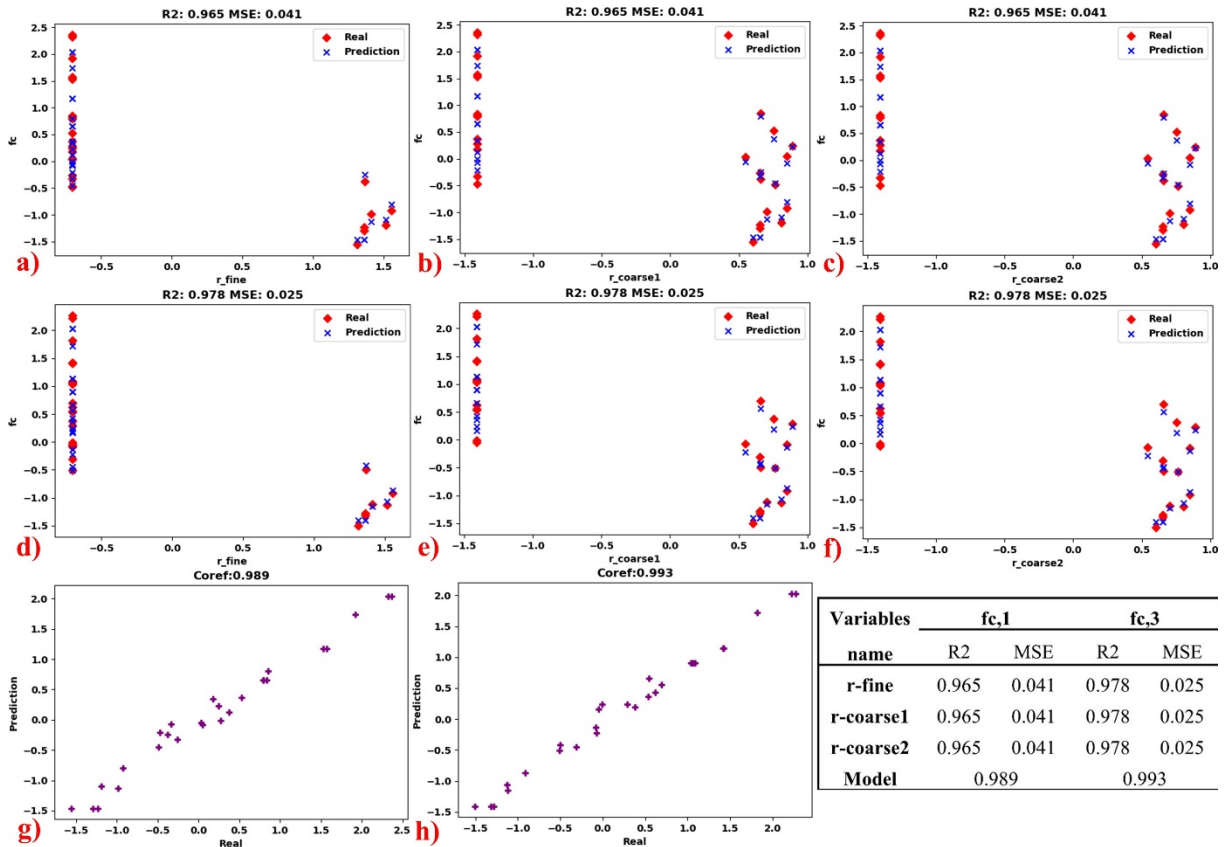
Figure 6. Compressive strength prediction results of models developed with RFR algorithm and its parameters.

### 3.6. KNN Experiments

The KNN regression experiments were carried out for 2 to 10 neighbours. The metric results of these values are given in Table 8. As can be seen in Figure 7, the prediction errors are relatively noticeable at the values where the actual value is less than 25.

**Table 8.** KNN regression results for different neighbour numbers

Class	Neighbour Number									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$f_{c,1}$ day	$R^2$	0.957	0.965	0.949	0.942	0.946	0.924	0.914	0.907	0.910
	MSE	0.050	0.041	0.060	0.067	0.063	0.089	0.101	0.108	0.104
$f_{c,3}$ days	$R^2$	0.973	0.978	0.965	0.960	0.961	0.945	0.939	0.932	0.937
	MSE	0.031	0.025	0.040	0.045	0.044	0.062	0.068	0.077	0.071



**Figure 7.** Compressive strength prediction results of models developed with KNN algorithm and its parameters.

### 3.7. FFNNR Experiments

The last regression algorithm used in this study is FFNNR [32]. It can be seen from Figure 8 that the  $f_{c,3}$  days predictions were more successful. However, FFNN models have many hyper-parameters that affect the result. Although optimizing these parameters is the subject of another study, we observed the effect of different LR values of the model developed. The metric results obtained in these additional tests are given in Figure 9. In the analyses,  $R^2$  and MSE values were observed according to LR change. The most successful LR values were found to be 0.089 for  $f_{c,1}$  day, and 0.078 for  $f_{c,3}$  days. The best  $R^2$  and MSE values obtained were also captured with these LRs.

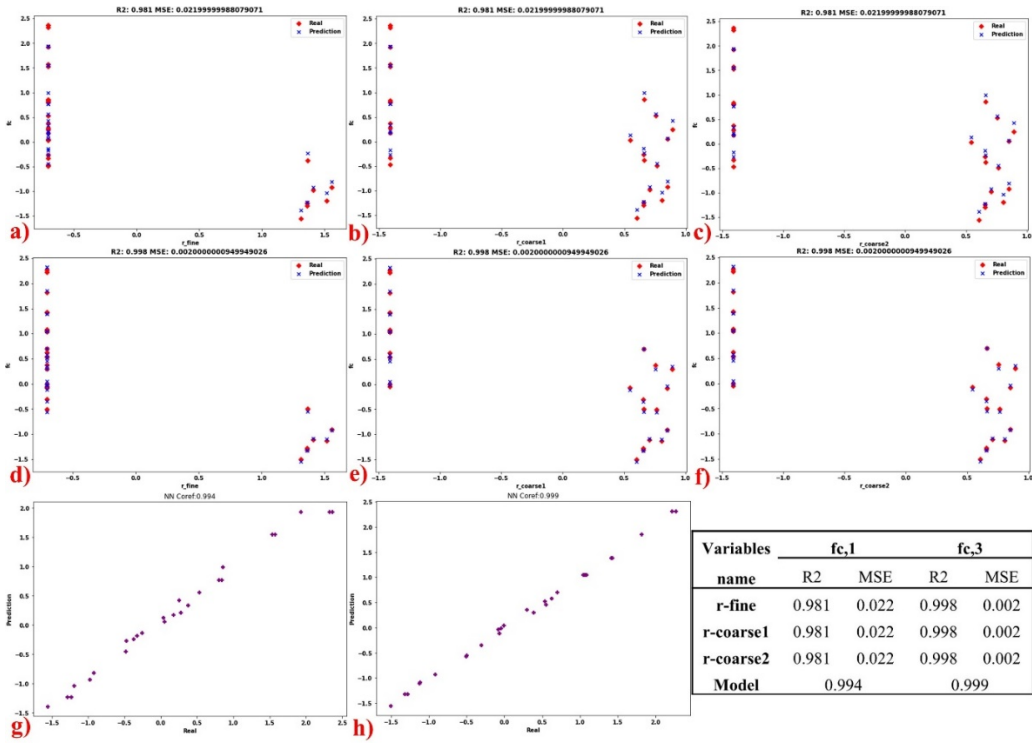


Figure 8. Compressive strength prediction results of models developed with FFNNR algorithm and its parameters.

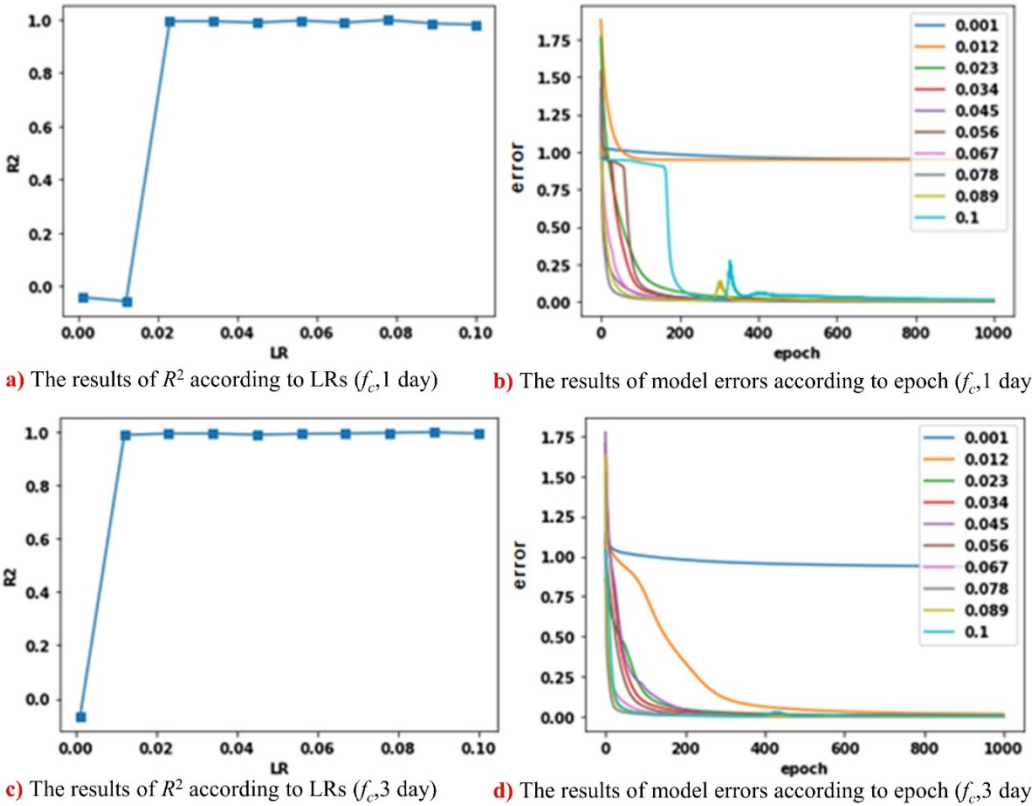


Figure 9. The results of  $R^2$  and model errors for different LR.

#### 4. Discussion

The performance of the MLR method is high in both data sets. It is also possible to examine the strength value predicts of RCA in terms of attributes. For example, the actual and predicted values of  $f_c$ , 1 day were compared according to the  $r_{\text{fine}}$ ,  $r_{\text{coarse1}}$  and  $r_{\text{coarse2}}$  attributes. As can be seen in these comparisons, the performance was even higher at values greater than zero for these attributes. The prediction errors often occurred on data where these metric values were 0. In both data sets, the prediction performance of all values where the  $r_{\text{fine}}$  parameter was different from zero was more successful than the non-zero values of the other parameters. Prediction errors were generally between 25-35. In the polynomial regression experiments, the best  $R^2$  value for  $f_c$ , 1 day was 0.997 and the MSE value was 0.170. These values were 0.998 and 0.148 for  $f_c$ , 3 days, respectively. The most successful value for  $f_c$ , 1 day was obtained when the polynomial degree was 4. Increasing the degree of polynomial initially increased the performance, but after the 6th order, the performance deteriorated. A similar situation was observed for  $f_c$ , 3. In both  $f_c$ , 1 day and  $f_c$ , 3 day experiments, the correlation value reached a very high value of 0.999. In both data sets, the prediction performance of all values where the  $r_{\text{fine}}$  parameter was different from zero was more successful than the non-zero values of the other parameters. Prediction errors were generally between 25-35.

In SVR, the correlation value for  $f_c$ , 1 is 0.998, while  $f_c$ , 3 is 0.999.  $f_c$  performs are better at non-zero  $r_{\text{fine}}$  values in the 3-days data set. Prediction errors occurred while  $f_c$ , 3 days was generally between 25-35, and  $f_c$ , 1 day was below 25. Besides, in experiments with the DT model,  $R^2$  values of RCAs for  $f_c$ , 1 day and  $f_c$ , 3 day were 0.968-0.887, and MSE values were 1.880-8.081, respectively. These results were lower than the previously used models. However, the correlation values were 0.986 for  $f_c$ , 1 day, and 0.948 for  $f_c$ , 3 day. In RFR, increasing the number of trees for the data sets did not have a clear effect on the result. Compared to DT, performance decreased for  $f_c$ , 1 day and increased for  $f_c$ , 3 day. However, overall performance was poor compared to other methods. According to the prediction results of  $f_c$ , 1 day and  $f_c$ , 3 days, the correlation values were 0.961 and 0.989, respectively. Looking at the prediction comparisons, it was seen that the prediction errors are at the points where the true value was between 25-35. The best  $R^2$  and MSE values of K-NN for both  $f_c$ , 1 day and  $f_c$ , 3 days were obtained by evaluating the 3 nearest neighbors. As a result of  $f_c$ , 1 day experiments, the best  $R^2$ , and MSE values are 0.965-0.050, while these values for  $f_c$ , 3 days were 0.978-0.025. The increase in the number of neighbours negatively affected the performance. The correlations between the predicted and actual values of the  $f_c$ , 1 day, and  $f_c$ , 3 days experiments were 0.989 and 0.993, respectively.  $R^2$  and MSE values obtained in regression analyses with two-layer FFNNR, each containing 30 nodes, were 0.981-0.022 for  $f_c$ , 1 day and 0.998-0.020 for  $f_c$ , 3 days. The correlation results for both data sets were 0.994 and 0.999 respectively. Accordingly, the results of the FFNNR analysis for  $f_c$ , 3 days were more successful.

Observed variability in performance between different machine learning algorithms on the same dataset can be attributed to a variety of factors that reflect the inherent complexities and nuances associated with the algorithms and dataset. When the results are analyzed, it is seen that there is a non-linear relationship in the data set. In such data spaces, the performance of models such as Polynomial Regression and SVR may come to the forefront. In general, although a certain success was achieved in all models, the nonlinear relationship was captured even better with Polynomial Regression, SVR and FFNNR.

#### 5. Conclusions

This study aimed to adapt seven different well-known machine learning regression algorithms, rather than a single method, to predict with high accuracy the early wet compressive strength of concrete mixtures containing different proportions of recycled concrete aggregates. This paper is also unique in that it simultaneously predicts the early age compressive strength of concrete produced using construction demolition waste using seven different machine methods. The reduction of environmental pollution and the effect of recycled concrete aggregates on strength by enabling waste materials to be reduced, recycled, and reused by using post-earthquake recycled concrete aggregates were examined in detail.

While the best performance for  $f_c$ , 1 day was given by Polynomial regression, SVR, and FFNNR, respectively, in the experiments, these three methods achieved approximately the same success in the  $f_c$ , 3 days experiments. In general, the 4th order Polynomial regression model stands out as the most appropriate model. The lowest performance for  $f_c$ , 1 day was observed in RFR analysis, and the lowest performance for  $f_c$ , 3 days was observed in DTR. Especially considering that thousands of new buildings were built after the earthquake in Elazig, it becomes even more important to estimate the early-age compressive strength using different machine learning algorithms. It is thought that evaluating these wastes, which arise in terms of sustainable development and circular economy, will provide significant environmental and economic gains by reducing the consumption of natural resources and reusing these materials. The authors will focus on metaheuristic optimization-based machine learning methods in their future studies in order to obtain better results in terms of different metrics.

## Acknowledgement

This research is supported by the Scientific Research Project Fund of Firat University under the project number MF.21.52.

## References

- [1] Oikonomou ND. Recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 2005; 27: 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>.
- [2] Farina I, Colangelo F, Petrillo A, Ferraro A, Moccia I, Cioffi R. LCA of concrete with construction and demolition waste, in: *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, Elsevier 2020; 501–513. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00024-3>.
- [3] de Andrade Salgado F, de Andrade Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *Journal of Building Engineering* 2022; 52: 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>.
- [4] Abed M, Foft J, Rashid K. Multicriterial life cycle assessment of eco-efficient self-compacting concrete modified by waste perlite powder and/or recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 2022; 348: 128696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128696>.
- [5] Qin D, Zong Z, Dong C, Guo Z, Tang L, Chen C, Zhang L. Long-term behavior of sustainable self-compacting concrete with high volume of recycled concrete aggregates and industrial by-products, *Structural Concrete* 2023; 24: 3385–3404. <https://doi.org/10.1002/suco.202200464>.
- [6] Yan Y, Gao D, Yang L, Pang Y, Zhang Y. Evaluation method of shear toughness for steel fiber-reinforced concrete containing recycled coarse aggregate, *Structural Concrete* 2023; 24: 2879–2893. <https://doi.org/10.1002/suco.202200324>.
- [7] Kapoor K, Singh SP, Singh B. Improving the durability properties of self-consolidating concrete made with recycled concrete aggregates using blended cements, *International Journal of Civil Engineering* 2021; 19: 759–775. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00584-7>.
- [8] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatović I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Management* 2010; 30: 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [9] Tao X, Zhang J, Zhang Y, Li X, Zhang M. Bond Behavior Between High-Strength Recycled Aggregate Concrete and UHSSB Using Beam Test, *International Journal of Civil Engineering* 2022; 20: 1129–1144. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00719-y>.
- [10] Wang J, Xu Q. The combined effect of load and corrosion on the flexural performance of recycled aggregate concrete beams, *Structural Concrete* 2023; 24: 359–373. <https://doi.org/10.1002/suco.202100819>.
- [11] Yang C, Feng H, Esmaceli-Falak M. Predicting the compressive strength of modified recycled aggregate concrete, *Structural Concrete* 2022. <https://doi.org/10.1002/suco.202100681>.
- [12] Ulucan M, Alyamac KE. A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental, *Waste Management* 2022; 146: 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [13] Ulucan M, Alyamac KE. An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: example of the Elysium, *Structural Concrete* 2023; 24: 3329–3350. <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.
- [14] Kul A, Ozel BF, Ozcelikci E, Gunal MF, Ulugol H, Yildirim G, Sahmaran M. Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste, *Journal of Building Engineering* 2023; 78: 107546. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107546>.
- [15] Ilcan H, Sahin O, Unsal Z, Ozcelikci E, Kul A, Demiral NC, Ekinci MO, Sahmaran M. Effect of industrial waste-based precursors on the fresh, hardened and environmental performance of construction and demolition wastes-based geopolymers, *Construction and Building Materials* 2023; 394: 132265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132265>.
- [16] Özçelikci E, Oskay A, Bayer İR, Şahmaran M. Eco-hybrid cement-based building insulation materials as a circular economy solution to construction and demolition waste, *Cement and Concrete Composites* 2023; 141: 105149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105149>.
- [17] Ulucan M, Alyamac KE. A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material, *Environmental Science and Pollution Research* 2023; 30: 97765–97785. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>.
- [18] Ulucan M, Yildirim G, Alatas B, Alyamac KE. A new intelligent sunflower optimization based explainable artificial intelligence approach for early-age concrete compressive strength classification and mixture design of RAC, *Structural Concrete* 2023; 24: 7400–7418. <https://doi.org/10.1002/suco.202300138>.
- [19] Ulucan M, Tas Y, Alyamac KE. Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge, *Structural Concrete* 2023; 24: 5750–5768. <https://doi.org/10.1002/suco.202201018>.
- [20] Han B, Wu Y, Liu L. Prediction and uncertainty quantification of compressive strength of high-strength concrete using optimized machine learning algorithms, *Structural Concrete* 2022; 23: 3772–3785. <https://doi.org/10.1002/suco.202100732>.
- [21] Kandiri A, Golafshani EM, Behnood A. Estimation of the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm, *Construction and*

- Building Materials 2020; 248: 118676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118676>.
- [22] Zhang J, Huang Y, Wang Y, Ma G. Multi-objective optimization of concrete mixture proportions using machine learning and metaheuristic algorithms, *Construction and Building Materials* 2020; 253: 119208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119208>.
- [23] Golafshani EM, Arashpour M, Behnood A. Predicting the compressive strength of green concretes using Harris hawks optimization-based data-driven methods, *Construction and Building Materials* 2022; 318: 125944. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125944>.
- [24] Tam VWY, Butera A, Le KN, Da Silva LCF, Evangelista ACJ. A prediction model for compressive strength of CO2 concrete using regression analysis and artificial neural networks, *Construction and Building Materials* 2022; 324: 126689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126689>.
- [25] Amiri M, Hatami F. Prediction of mechanical and durability characteristics of concrete including slag and recycled aggregate concrete with artificial neural networks (ANNs), *Construction and Building Materials* 2022; 325: 126839. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126839>.
- [26] Adam SP, Alexandropoulos SAN, Pardalos PM, Vrahatis MN. No free lunch theorem: A review, *Approximation and optimization* 2019; 57–82. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12767-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12767-1_5).
- [27] Jobson JD. Multiple linear regression, in: *Applied Multivariate Data Analysis*, Springer 1991: 219–398. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0955-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0955-3_4).
- [28] Jobson JD. *Applied multivariate data analysis: volume II: Categorical and Multivariate Methods*, Springer Science and Business Media, 2012. [https://doi.org/10.1007/0-387-22753-9\\_8](https://doi.org/10.1007/0-387-22753-9_8).
- [29] Awad M, Khanna R. Support vector regression, *Efficient Learning Machines* 2015: 67-80. [https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_4).
- [30] Ince K, Klawonn F. Decision and regression trees in the context of attributes with different granularity levels, *Towards Advanced Data Analysis by Combining Soft Computing and Statistics* 2013: 331–342. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-30278-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30278-7_26).
- [31] Vanneschi L, Castelli M, Manzoni L, Silva S, Trujillo L. Is k Nearest Neighbours Regression Better Than GP?, *European Conference on Genetic Programming* 2020: 244–261. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44094-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44094-7_16).
- [32] Caselli M, Trizio L, De Gennaro G, Ielpo P. A simple feedforward neural network for the PM10 forecasting: comparison with a radial basis function network and a multivariate linear regression model, *Water Air and Soil Pollution* 2009; 201: 365–377. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9950-2>.

## Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Bulanık Hata Türü ve Etkileri Analizi (Bulanık HTEA): Mobilya Sektöründe Bir Uygulama

Naciye KARAKUZU<sup>1</sup> Seda KARADAĞ<sup>2</sup> Nilgün İNCE<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup> Endüstri Mühendisliği, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye  
<sup>1</sup>naciye\_karakuzu@hotmail.com, <sup>2</sup>seda-karadag@outlook.com, <sup>3</sup>nilgun.ince@alanya.edu.tr

(Geliş/Received: 15/12/2023;

Kabul/Accepted: 19/07/2024)

**Öz:** Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliği (İSG) 2012 yılında yürürlüğe giren kanunla daha da önemli hale gelmiştir. Bu kapsamda işletmeler, riskli durumları belirleyerek iş kazalarının oluşmasını önlemeyi amaçlamaktadır. Hataların (tehlikeli durumların) önem derecesine göre sıralanması etkin önlem planının oluşturulması için önemlidir. Hata türü ve etkileri analizi (HTEA) tekniği ile hatalar henüz ortaya çıkmadan önlenmektedir. Bu yöntemde hatalar için belirlenen risk öncelik sayılarına (RÖS) göre hangi hataların öncelikli olarak önlenmesi gerektiği belirlenmekte ve buna bağlı olarak da hata önleme planı oluşturulmaktadır. Bu çalışmada mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın üretim operasyonlarından elde ettiği veri setleri kullanılarak HTEA ve bulanık HTEA yöntemleriyle risk analizi yapılmıştır. Kullanılan veri seti İSG uzmanı tarafından belirlenen tehlikeli durumlar ve her bir tehlikeli durum için belirlenen olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik (fark edilebilirlik) değerlerini içermektedir. Çalışma kapsamında, klasik HTEA yönteminde eşit olarak ağırlıklandırılan olasılık, şiddet ve ağırlık faktörlerinin Matlab programı kullanılarak bulanıklaştırılması sağlanmış ve iki yöntemin sonuçları kıyaslanmıştır. Daha etkin bir hata önleme planı hazırlamada bulanık mantık yaklaşımının önemi tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Hata türü ve etkileri analizi, iş sağlığı ve güvenliği (İSG), risk öncelik göstergesi (RÖS), mobilya sektörü, bulanık mantık.

### Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (Fuzzy FMEA): A Case Study at Furniture Company

**Abstract:** Occupational health and safety (OHS) in Türkiye has become even more important with the law that came into force in 2012. In this context, businesses aim to prevent occupational accidents by identifying risky situations. Failures (dangerous situations) should be ranked according to their severity to have an effective precaution plan. With the failure mode effects and analysis (FMEA) technique, failures can be prevented before they occur. In this method, it is determined which failures should be prevented primarily according to the risk priority numbers (RPN) determined for each failure, and an error prevention plan is created accordingly. In this study, operational risk assessment dataset is utilized to apply FMEA and fuzzy FMEA methods to assess potential risks in a furniture manufacturing company. The utilized data set includes hazardous situations determined by the OHS expert and the probability, severity and detection values determined for each hazardous situation. Within the scope of the study, equally weighted occurrence (probability of occurrence), severity, and detection parameters in the classical FMEA method, are fuzzified and the results of the two methods are compared. The importance of the fuzzy logic approach in making a more effective failure precaution plan has been discussed.

**Key words:** Failure modes and effects analysis (FMEA), occupational health and safety (OHS), risk priority indicator (RPI), furniture industry, fuzzy logic.

## 1. Giriş

Gelişen sanayi ve teknoloji ile çalışma ortamlarının iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kurallarına uygunluğunun önemi artmıştır. Ülkemizde, iş yerlerindeki personel eğitimlerinin yetersizliği, koruyucu donanım yetersizliği, çalışanların iş kazalarını önemsememesi, kaza kayıtlarının tutulmaması gibi durumlardan dolayı sıklıkla iş kazası meydana gelmektedir. 2012 yılında kabul edilen 6331 sayılı kanun ile İSG konusu işletmeler için daha da önemli hale gelmiştir. Ülke nüfusunun %35 - 65’ini oluşturan iş görenler, zamanlarının dörtte birini iş yerlerinde geçirmektedir. İş yerlerinde sağlık ve güvenlik bakımından birçok tehdit edici unsurla karşı karşıya kalan çalışanlar yaşadıkları iş kazaları sonucu maddi ve manevi kayıplar yaşamaktadırlar. Yaşanan iş kazalarının ve meslek hastalıklarının ülkelerin ulusal gelirlerinin %4’üne denk bir kayıp oluşturduğu belirlenmiştir [15].

\* Sorumlu yazar: [nilgun.ince@alanya.edu.tr](mailto:nilgun.ince@alanya.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9494-7577, <sup>2</sup> 0000-0001-9091-724X, <sup>3</sup> 0000-0003-1148-3047



Ülkemizde İSG açısından inşaat, maden ve metal sektörleri en çok kayıp verilen sektörlerdir. Bu sektörleri ise tekstil, deri, mobilya ve gıda ürünleri sektörleri takip etmektedir. Bu kapsamda iş yeri koşullarının iyileştirilmesi için Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından birçok proje yürütülmektedir. Mobilya sektöründeki işletmeler tehlikeli veya çok tehlikeli sınıfta yer almaktadır. Bu işletmelerde güvenlik kültürü eksikliği, personel değişim hızının çok olması, sendikalaşma oranının düşük olması ve eğitim fırsatlarına erişimin sınırlı olması gibi sebeplerden dolayı iş kazaları sıklıkla yaşanmaktadır [16]. Uluslararası çalışma örgütüne (ILO) üye olan ülkemizde, iş kazalarının önüne geçilmesi için çok tehlikeli ve tehlikeli sınıfta yer alan özel sektöre ait bütün işlere ve işverenlere belirli şartları sağlamaları durumunda maddi destek sağlanmaktadır [1]. Ayrıca iş yerleri Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı bünyesindeki iş teftiş kurulları tarafından düzenli olarak teftiş edilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği konusundaki yasal zorunluluklar, devlet destekleri ve artan kayıplar iş yeri sahiplerinin bu konuya gerekli önemi vermesini sağlamaktadır. İş yerlerinde kaza oluşmadan kazayı oluşturabilecek durumların analiz edilmesi ve önlem alınması gereken durumların belirlenmesi literatürde “risk analizi” olarak geçmektedir. Risk analiz yöntemlerinde amaç potansiyel tehlikeleri belirlemek ve önlem almak böylece kazaya sebebiyet veren durumları ortadan kaldırmaktır. Literatürde hata türü etkileri analizi, fine-kinney analizi, L tipi matris yöntemi, hata/olay ağacı metodu gibi birçok risk analiz metodu bulunmaktadır. Bu yöntemlerden HTEA uygulanması kolay olması ve etkin bir şekilde önlem planı geliştirmesi yönüyle diğer metotlardan ayrılmaktadır [3]. Pro-aktif bir yaklaşımla hangi durumlara ivedi olarak önlem alınması gerektiğinin belirlenmesi işverenler için maliyet avantajı sağlamaktadır. Çünkü riskli durumları değiştirmek için ayrılacak olan bütçe sınırlı olabilmektedir.

HTEA yönteminde ele alınan durum için olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik faktörlerinin belirlenmesi ilk aşamadır. Risk faktörleri olarak belirtilen bu parametreler için durumun ciddiyetini ifade eden sayısal değerler uzmanlar tarafından belirlenir. Risk faktörlerinin çarpılmasıyla risk öncelik sayısı (RÖS) hesaplanır ve bu sayı hangi riskler için öncelikle tedbir alınacağı belirlenmesinde kullanılır. Yöntem birçok konuda başarıyla uygulanmakla birlikte bazı zayıf yönleri vardır. HTEA yönteminde risk faktörlerinin sayısal olarak belirlenmesi uzmana göre farklılık göstermektedir ve risk faktörleri (olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik) eşit önemde değerlendirilmektedir. Faktörlerin eşit önemde değerlendirilmesi sonucu farklı sayısal değerler içeren iki durum aynı RÖS değerine sahip olmaktadır. Ayrıca şiddet değeri yüksek ancak olasılık ve tespit edilebilirlik değeri düşük olan durumlarda faktörler RÖS hesabında eşit önemde değerlendirildiği için tedbir planında sonlarda yer almaktadır. Benzer şekilde faktörlerden herhangi birinin diğerlerine göre yüksek sayısal değer aldığı durumlar tedbir planında sonlarda değerlendirilmektedir. Bu durum yöntemin zayıf yönleri olarak belirtilmiştir. Literatürde belirtilen zayıf yönlerin üstesinden gelmek için HTEA yöntemi bulanık mantık, kaba küme teorisi, bulanık gri teorisi ve çok kriterli karar verme yöntemleriyle (Ahp, Topsis, Vikor gibi) birlikte kullanılmıştır [4].

Bu çalışmada mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir işletme için operasyonel seviyede risk analizi yapılmıştır. HTEA yöntemi ve bulanık HTEA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizde etkin bir önlem planı oluşturulması amaçlanmıştır. Literatürde mobilya sektöründe HTEA veya bulanık HTEA yönteminin uygulandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmayla literatürdeki bu açık kapatılmış ve iş kazalarının çok olduğu bu sektör için örnek bir uygulama çalışması literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca HTEA yönteminin dezavantajlı yönlerinin giderilmesi için bulanık yaklaşım kullanımının önlem planı hazırlamadaki etkisi araştırılmış ve iki yöntem kıyaslanmıştır.

Literatürde HTEA yönteminin operasyonel seviyede birçok farklı alanda uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda hayvanların kısırlaştırılma süreçlerindeki riskler [5], beyaz eşya lojistik faaliyetlerindeki riskler [6], talaşlı imalat atölyesindeki riskler [7], tehlikeli madde elleçleme süreçlerindeki riskler [8], mermer üretim süreçlerindeki riskler [9] ve patoloji laboratuvarı tetkik süreçleri [3] analiz edilmiştir. Risklerin belirlenmesi ve önlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmalar sonucunda üretim maliyetlerinin azaldığı [7] ve olası iş kazalarının önüne geçildiği [3, 5, 6, 8] belirtilmiştir. HTEA yönteminin kullanıldığı süreçler belirtilen alanlarla sınırlı olmayıp otomotivden uzaya kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İmalat süreçlerinde kalite problemlerini önlemek amacıyla geliştirilen yöntem son yıllarda İSG alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte farklı terminolojisi olan yöntemin İSG süreçlerinde etkin olarak nasıl uygulanacağı ve değerlendirmelerin nasıl yapılacağı net değildir [10]. Literatürdeki vaka analizleri incelendiğinde ise mobilya sektöründe yöntemin uygulandığı bir çalışma örneğine rastlanmamıştır. Yöntemin mobilya sektörüne nasıl uygulanabileceği gerçek hayat verileri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen veri setine dair detaylar bölüm 3.1’de, yöntemin detayları bölüm 3.2’de ve bulanık mantık yaklaşımının HTEA yöntemine uyarlanması aşamaları ise bölüm 3.3’te anlatılmıştır. Deneysel sonuçlar görselleştirilerek bölüm 4’te yorumlanmış ve son olarak da sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Çalışma kapsamında özel sektörde faaliyet gösteren bir mobilya fabrikasındaki tehlikeli durumlar analiz edilmiştir. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı iş müfettişleri tarafından üretim sahasındaki tüm bölümler gezilerek hazırlanan veri seti tablo olarak (excel dosyası) kaydedilmiştir. Firmanın kalite bölümünden temin edilen bu dokümanlar çalışmanın veri setini oluşturmaktadır. Bu veri seti, İSG uzmanları tarafından belirlenen tehlikeli durumların tanımlarını ve bu durumların kazaya sebebiyet vermesi durumunda oluşturacağı etkileri içermektedir. Ayrıca her bir durum için olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik risk dereceleri de yine uzmanlar tarafından belirlenmiştir. İşletmeden alınan bilgiye göre bu veri setleri doğrultusunda risk öncelik planı oluşturulmakta ve “öncelikli müdahale gerektiren” riskli durumlar risk öncelik sayıları (RÖS) hesaplanarak belirlenmekte ve gerekli tedbirler alınmaktadır. Kullanılan veri seti dört yılda bir güncellenmektedir.

### 2.2. Hata türü ve etkileri analizi (HTEA) yöntemi (Failure mode and effect analysis (FMEA) method)

HTEA yöntemi imalat süreçlerinde karşılaşılan kalite problemlerini önlemek amacıyla geliştirilen bir yöntem olduğu için müşteri memnuniyetinin konu olduğu her faaliyet aşamasında kullanılmaktadır. Sistem fonksiyonları arasındaki muhtemel hataların tespiti için sistem HTEA, ürün veya hizmet tasarımı aşamasındaki muhtemel hataların tespiti için tasarım HTEA, üretim süreçleri ve montaj operasyonlarındaki yetersizliklerin belirlenmesinde proses HTEA ve ürünün müşteriye ulaşma sürecindeki durumlar için servis HTEA kullanılır [11]. İSG süreçlerinde HTEA yöntemi tehlikeli durumların analizi amacıyla kullanılmaktadır. Mevcut iş aşamalarında potansiyel tehlikeler iş kazalarına sebebiyet vermekte, yaralanma veya ölüm riski oluşturmaktadır. Bu yöntemde risk öncelik sayıları (RÖS) hesaplanarak mevcut durumdaki tehlikeli durumların önem derecelerinin belirlenmesi sağlanır. RÖS sayısı yüksek olan durumlar öncelikli olarak ortadan kaldırılması gereken durumlardır. RÖS sayılarının hassasiyetle hesaplanması ivedilikle müdahale edilmesi gereken durumların doğru belirlenmesini sağlar. Eğer bu değer doğru bir şekilde belirlenmezse, ciddi yaralanmalara veya ölümlere sebebiyet verebilecek durumlar için önlem almakta gecikilebilir. RÖS sayısı ele alınan durumla ilgili olasılık (O), şiddet (Ş) ve tespit edilebilirlik (T) (fark edilebilirlik) değerlerinin çarpımıyla elde edilir. Eşitlik (1)'de RÖS sayısı hesabının formülü verilmiştir.

$$\text{Risk öncelik sayısı (RÖS)} = O \times \text{Ş} \times T \quad (1)$$

Olasılık değeri kazaya sebebiyet verebilecek durumun oluşma olasılığını, şiddet değeri bu durumun zarar verme potansiyelini ve tespit edilebilirlik de durumun keşfedilmesinin zorluğunun derecelendirilmesi olarak ifade edilir. Bu parametrelerden her biri 1 ile 10 arasında değer almaktadır. Bu parametreler için uygulamalarda kullanılan dereceler ve açıklamaları aşağıdaki tablolarda (Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3) verilmiştir [9].

**Tablo 1.** Olasılık parametresi ve derecelendirmesi.

Oluşma Olasılığı	Hatanın Olasılığı	Risk Derecesi
Çok yüksek (kaçınılmaz hata)	0,33 'ten veya 0,5'ten çok	9 - 10
Yüksek (tekrarlayan hata)	0,125'ten veya 0,05'ten çok	7 - 8
Orta (ara sıra olan hata)	0,0125'ten veya $0,25 \times 10^{-2}$ 'den çok	5 - 6
Düşük (nispeten az olan hata)	$0,5 \times 10^{-3}$ 'ten veya $0,66 \times 10^{-4}$ 'ten çok	3 - 4
Pek az (olası olmayan hata)	$0,66 \times 10^{-5}$ veya daha az	1 - 2

Bu tablolardaki (Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3) risk derecesi sütunları uzmanların durumun ciddiyetiyle ilgili belirlediği puan değerini ifade etmektedir. Bu kapsamda yüksek risk düzeyi oluşturan durumlar yüksek risk

derecesine, düşük risk durumu oluşturan durumlar ise düşük risk derecesine sahiptir. Tablo 1’deki oluşma olasılığı sütunu durumun olma ihtimaliyle ilgili sözel ifadelerdir ve her bir durum için hesaplanan olasılık değeri hatanın olasılığı sütununda verilmiştir.

**Tablo 2.** Şiddet parametresi ve derecelendirmesi.

Etki	Şiddetin Etkisi	Risk Derecesi
Uyarısız gelen (yüksek) tehlike	Uyarısız gelen ve yüksek hasara (toplu ölümlere yol açacak) veya felakete sonuçlanabilecek muhtemel hata	9 - 10
Yüksek / Çok yüksek	Yıkıcı etkiye sahip sistemin veya ekipmanın tamamen hasar görmesine sebep olan, ölüm, zehirlenme vb. ile sonuçlanan hata	7 - 8
Düşük / Orta	Kırık, kalıcı iş görmezlik, beyin sarsıntısı vb. ile sonuçlanan veya sistemin performansını etkileyen, ağır yaralanma, kanser vb. ile sonuçlanan hata	5 - 6
Küçük / Çok düşük	Sistemi yavaşlatan veya incinme, sıyrıklar veya eziklerle sonuçlanan hata	3 - 4
Yok / Çok küçük	Sistemin çalışmasını etkilemeyen veya kargaşaya sebep olan hata	1 - 2

Tablo 2’de de tehlikenin etkisi için belirlenen sözel ifadeler ilk sütunda yer almaktadır. Durum gerçekleştiğinde nasıl bir etki oluşacağı şiddetin etkisi sütununda açıklanmıştır.

**Tablo 3.** Saptanabilirlik parametresi ve derecelendirmesi.

Saptanabilirlik Durumu	Saptanabilirlik Olasılığı	Risk Derecesi
Çok az / Fark edilemez	Potansiyel hatanın nedeninin saptanabilirliği çok düşük veya saptanması mümkün değil	9 - 10
Az / Çok düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok düşük veya saptanabilirliği uzak	7 - 8
Orta / Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği orta veya düşük	5 - 6
Yüksek / Yüksek Ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek veya yüksek ortalama	3 - 4
Hemen hemen kesin / Çok Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği kesin gibi veya çok yüksek	1 - 2

Ele alınan durumun önceden fark edilmesinin (saptanabilirliği) zorluk derecesi ise saptanabilirlik durumu olarak Tablo 3’te gösterilmiştir. Ayrıca durumun ve nedenlerinin saptanma olasılık değerleri de tabloda gösterilmiştir. HTEA yönteminde hesaplanan RÖS değerleri Tablo 4’te belirlenen puan aralığına göre sınıflandırılır ve ele alınan riskli durum için önlem alma durumu belirlenmiş olur.

**Tablo 4.** RÖS değerlendirme tablosu.

RÖS değeri	Önlem Alma Durumu
$RÖS < 40$	Önlem almaya gerek yok
$40 \leq RÖS \leq 100$	Önlem alınabilir
$RÖS > 100$	Önlem alınması gereklidir

Çalışma kapsamında kullanılan veri setinde tespit edilebilirlik değerleri 3, 7, 15 veya 40 değerlerini almaktadır. Literatürde RÖS hesaplamasında kullanılan tespit edilebilirlik değerleri ise 1 ile 10 arasında değişmektedir. Veri setindeki en büyük değer (40) literatürdeki en büyük değer (10) ile oranlanmış ve veri setindeki değerlerin 1 ile 10 arasında olması için her bir değer 4'e bölünmüştür. Tablo 5'te veri setindeki değerlere karşılık RÖS hesaplamalarında kullanılan dönüştürülmüş değerler verilmiştir.

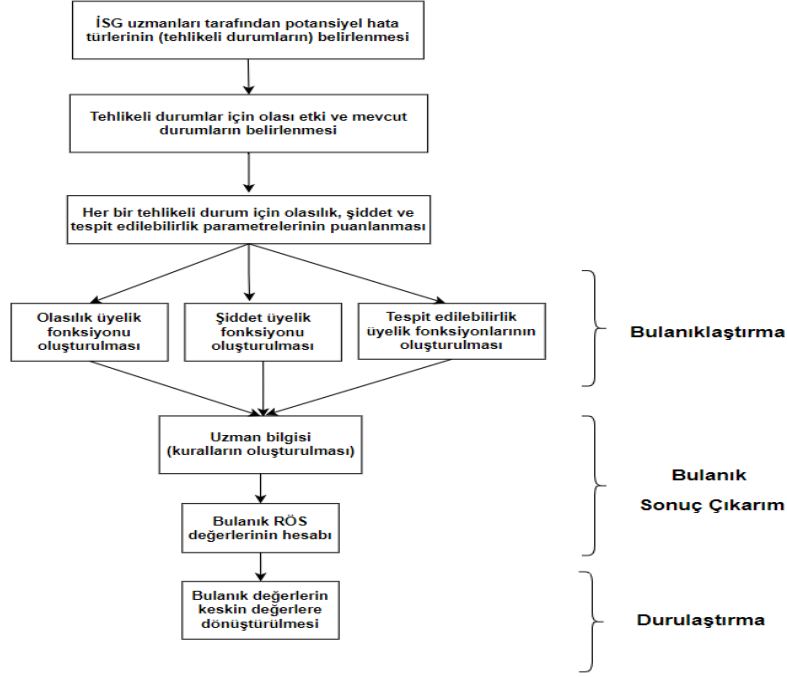
**Tablo 5.** 10'luk ölçeğe dönüştürülen tespit edilebilirlik değerleri.

Veri Setindeki Değerler	Dönüştürülen Değerler
3	1
7	2
15	4
40	10

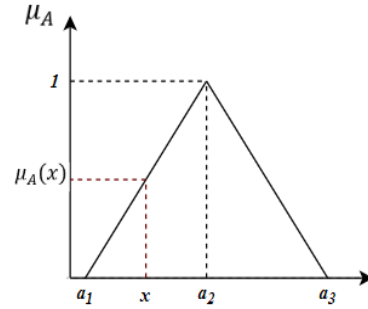
### 2.3. Bulanık HTEA yöntemi

Bulanık mantık 1965 yılında L. A. Zadeh tarafından geliştirilen ve belirsizlik olması veya veri setinde kesinlik olmaması durumlarında etkin bir şekilde kullanılan yöntemdir. Özellikle veri setinin öznel yargılar içermesi veya derecelendirilmiş dilsel değişkenlere (düşük, orta, yüksek, çok yüksek vb.) sahip olması durumlarında bulanık mantık yaklaşımı etkin olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık; bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırma olmak üzere üç aşamadan oluşur [12]. Şekil 1'de uygulanan risk analizi aşamaları ve bulanık HTEA uygulama adımları gösterilmiştir.

**Bulanıklaştırma:** Bulanıklaştırma adımı olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri için üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonları ile her bir parametrenin ilgili kümeye ait olma durumu belirlenir. Literatürde farklı üyelik fonksiyonları tanımlanmış olmakla birlikte üçgen üyelik fonksiyonları doğrusal olması ve kullanımının kolay olması dolayısıyla en sık kullanılan üyelik fonksiyonudur [13]. Üçgen üyelik fonksiyonu grafiği Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Risk analizi ve bulanık HTEA uygulama adımları.



Şekil 2. Üçgen üyelik fonksiyonu.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{(x-a_1)}{(a_2-a_1)}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ \frac{(a_3-x)}{(a_3-a_2)}, & a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (2)$$

Şekil 2’de görüldüğü gibi  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  değerleri fonksiyonun alt sınır, tepe noktası ve üst sınır değerleridir. Burada  $x$  değerinin hangi aralıkta yer aldığına bağlı olarak üyelik derecesi hesabı formül (2) kullanılarak yapılır. Üyelik derecesi 0 ile 1 arasında değişen değerler alabilmektedir. Şekil 3’te şiddet parametresinin Matlab bulanık mantık modülüne tanımlandığı ekran görüntüsü örnek olarak verilmiştir. Burada uzman görüşü doğrultusunda parametre değerleri için dilsel değişkenler “düşük”, “orta” ve “yüksek” olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde olasılık ve tespit edilebilirlik değerleri için de üyelik fonksiyonları belirlenen dilsel değişkenler kullanılarak tanımlanmıştır.



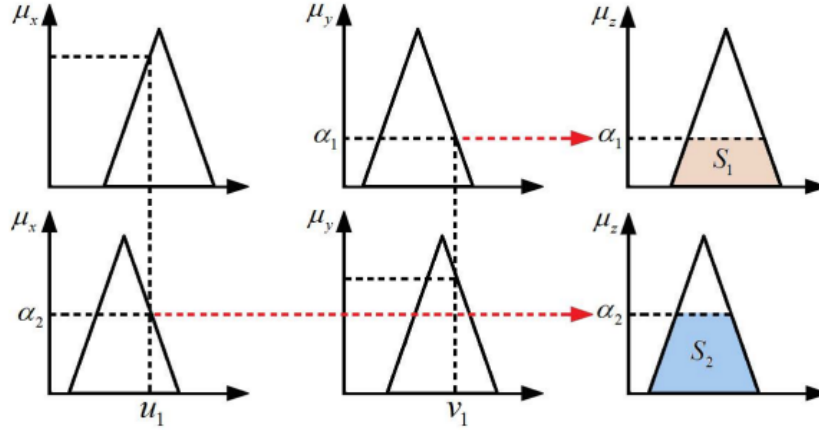
Şekil 3. Şiddet parametresi için üçgen üyelik fonksiyonu.

**Bulanık sonuç çıkarım:** Bu aşama, ele alınan durumun sonuçlarını belirlerken uzman görüşünün sisteme dâhil edilmesini sağlar. Geçmiş tecrübeler doğrultusunda belirlenen uzman görüşleri, her bir parametre değerleriyle ilgili dilsel değişkenlere karşılık çıktı değerlerinin belirlenmesini sağlar. Çalışma kapsamında Matlab'de oluşturulan kural tabanı Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Kural tabanı.

1	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış DÜŞÜK
2	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
3	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış DÜŞÜK
4	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
5	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
6	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet ORTA İSE Çıkış YÜKSEK
7	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
8	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet ORTA İSE Çıkış YÜKSEK
9	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış DÜŞÜK
10	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
11	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış DÜŞÜK
12	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
13	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
14	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet YÜKSEK İSE Çıkış YÜKSEK
15	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
16	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
17	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet ORTA İSE Çıkış YÜKSEK
18	EĞER Olasılık ORTA Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
19	EĞER Olasılık DÜŞÜK Tespit Edilebilirlik ORTA Şiddet ORTA İSE Çıkış ORTA
20	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik DÜŞÜK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış ORTA
21	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet DÜŞÜK İSE Çıkış YÜKSEK
22	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet ORTA İSE Çıkış YÜKSEK
23	EĞER Olasılık YÜKSEK Tespit Edilebilirlik YÜKSEK Şiddet YÜKSEK İSE Çıkış YÜKSEK

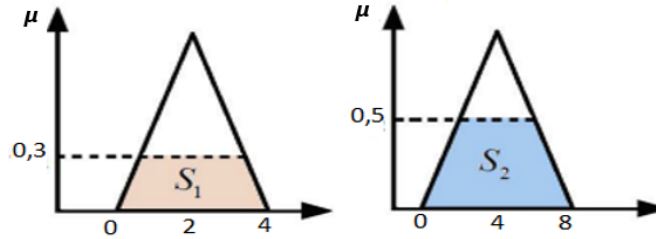
Bu çalışmada da en sık kullanılan çıkarım yöntemi olan [13] Mamdani (max, min operatörleri) çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde birleşim (maksimum) ve kesişim (minimum) işlemleri bulanık girdi parametrelerine uygulanır. Şekil 4'te Mamdani çıkarımının iki parametrelili ( $u_1$  ve  $v_1$ ) sisteme uygulanması ile elde edilen çıkış değeri ( $a_1$ ) gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi çıktı değeri de bulanık değer olmakta ve giriş parametrelerine kesişim (min) operatörü uygulanarak elde edilmektedir.



Şekil 4. Mamdani çıkarım yapısı [14].

**Durulaştırma:** Bu adım elde edilen bulanık değerlerin kesin değerlere dönüştürülmesini (normalize edilmesini) sağlayan adımdır. Literatürde maksimum üyelik derecesi, ağırlık merkezi yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi ve ortalama maksimum üyelik yöntemi olmak üzere farklı durulaştırma yöntemleri mevcuttur. Çalışma kapsamında literatürde sıklıkla kullanılan yöntem olan [13] ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma işlemi yapılmıştır. Bu yöntemde Mamdani çıkarımı ile elde edilen bulanık küme için kesin değerler tek bir ortalama ağırlık değeri hesaplanarak elde edilir. Ağırlık merkezi yönteminde hesaplamalar formül (3) yardımıyla yapılır.

$$du(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{u_i} u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{u_i}} \quad (3)$$

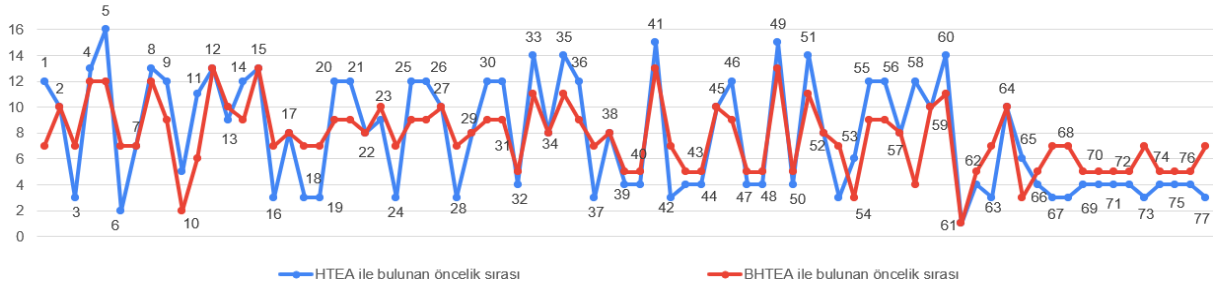


Şekil 5. Ağırlık merkezi yöntemi örneği.

Şekil 5'te iki farklı kural uygulanarak elde edilen çıkış bulanık kümeleri ( $S_1$  ve  $S_2$ ) için üyelik dereceleri (0,3 ve 0,5) ve orta nokta değerleri (2 ve 4) gösterilmiştir. Bu değerler için formül 3'teki denklem yardımıyla durulaştırma değeri 3,25 olarak hesaplanır.

#### 4. Deneysel Sonuçlar

Yapılan analizde kullanılan veri seti, klasik HTEA ile bulunan RÖS değerleri, öncelik sıralamaları ve bulanık HTEA yöntemiyle bulunan sonuçlar "veri paylaşımı" kısmında verilen bağlantı adresinde paylaşılmıştır. Yapılan analiz sonucunda bulunan RÖS değerleri ve öncelik sıraları, klasik yöntemde eşit puan alan durumlar ve öncelik sırası bulanık HTEA ile değişen durumlar kendi içinde gruplanarak değerlendirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda her iki yöntemle de bulunan öncelik sıralamaları Şekil 6'da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. HTEA ve BHTEA yöntemi ile bulunan öncelik sıraları.

Şekil 6’da görüldüğü gibi HTEA yöntemi ve bulanık HTEA yöntemi ile bulunan öncelik sıraları ele alınan birçok durum için değişiklik göstermektedir. Bulanık HTEA ile bulunan sonuçlar incelendiğinde veri setindeki 77 durumdan 16’sı için öncelik sırası değişmemiş, 27’si daha öncelikli hale gelmiş (öncelik sırası 12’den 7’ye düşmüş vb.) ve 34’ü ise öncelik sıralamasında daha gerilerde (öncelik sırası 2’den 7’ye çıkmıştır vb.) yer almıştır. Değişim olan durumlar incelendiğinde (Tablo 7) şiddet değerinin yüksek (10) ancak olasılık (3) ve tespit edilebilirlik (1) değerinin düşük olduğu 58.durum öncelik sırası en fazla değişen durumdur. Bu durum parametre değerlerinin eşit önemde değerlendirildiği HTEA yönteminde 12.sırada önlem alınması gereken durum olarak bulunurken bulanık HTEA yönteminde ise 4.sırada yer almaktadır. Benzer şekilde 11.durumda da tespit edilebilirlik değeri çok düşük (1) olduğu için klasik yöntemde önem sırası 11 olarak belirlenmiş ancak bulanık yöntemde 6.sırada yer almıştır. Bu durum klasik yöntemin dezavantajı olan parametre değerlerinin eşit önemde değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bulanık yöntemde ise parametrelerin bulanık sayı olarak sisteme tanımlanması ve kural tabanı ile uzman görüşünün sisteme dâhil edilmesiyle bulunan sonuçlar her bir parametre değerine daha hassas olarak belirlenebilmektedir.

Tablo 7. Öncelik sırası bulanık yöntemle üst sıralarda yer alan durumlar.

NO	Olasılık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik	RÖS (HTEA)	Öncelik Sıralaması	RÖS Bulanık HTEA	Öncelik Sıralaması
1	6	1	4	24	12	5	7
5	6	2	1	12	16	44	12
11	6	6	1	36	11	511	6
58	3	10	1	30	12	516	4

Hesaplanan RÖS değerleri değerlendirildiğinde de benzer durum görülebilmektedir. Tablo 8’de HTEA yöntemiyle RÖS değeri 24 veya 36 olan durumlar gösterilmiştir. HTEA yönteminde RÖS değeri 24 olan durumlar için bulanık RÖS değerleri 5, 44 ve 484 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde HTEA yöntemiyle RÖS değeri 36 olan durumlar için bulanık RÖS değeri dört farklı değer almaktadır (472, 488 ve 511). Bu değişiklik olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerinin bulanık sayılar olarak sisteme dâhil edilmesiyle sistemin girdi parametrelerine daha hassas olarak tasarlanmış olmasıyla açıklanabilir. Her bir parametre değeri bulanık sayı olarak tanımlanarak derecelendirilmiş böylece sonuç üzerinde tek bir parametrenin etkisi önemli hale gelmiştir. Bu değişime bağlı olarak da klasik HTEA ile eşit olarak hesaplanan RÖS değeri parametrelerin tekli etkisinin hesaba katıldığı bulanık yöntemde sonucu etkilemiştir.



**Tablo 8.** RÖS değeri 24 veya 36 olan durumlar için bulunan sonuçlar.

NO	Olasılık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik	RÖS (HTEA)	Öncelik Sıralaması	RÖS Bulanık HTEA	Öncelik Sıralaması
1	6	1	4	24	12	5	7
4	6	2	2	24	13	44	12
9	3	2	4	24	12	484	9
2	3	6	2	36	10	472	10
11	6	6	1	36	11	511	6
13	3	6	2	36	9	472	10
17	3	3	4	36	8	488	8

Bu sonuçlardan yola çıkarak parametre giriş değerlerinin bulanıklaştırılmasıyla parametre değerlerinin eşit önemde ele alınmasının önem derecesi belirlemedeki yan etkisi ortadan kaldırılmıştır denebilir. Özellikle şiddet derecesinin yüksek ancak olasılık ve tespit edilebilirlik değerlerinin düşük olduğu durumlar için iş yerlerinin öncelikli olarak önlem alması gereklidir. Bu kapsamda bulanık mantık yaklaşımıyla bulanık parametreler sisteme tanımlanmalı ve her bir parametrenin tekli etkisi de önlem planı geliştirmede dikkate alınmalıdır.

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın imalat işlemlerindeki operasyonel süreçler için risk analizi yapılmıştır. İSG uzmanlarının operasyonel süreçler için belirlediği riskli durumlar ve bu durumlarla ilgili olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerini içeren veriler çalışmada kullanılmıştır. HTEA ve bulanık HTEA yöntemleri uygulanmıştır. Bu iki yöntemin sonuçları analiz edilerek klasik yaklaşımda parametre değerlerinin eşit önemde değerlendirmeye alınmasının sonuçları nasıl etkilediği tartışılmıştır. Bulanık HTEA'da her bir parametre değeri bir fonksiyon olarak (üçgen üyelik fonksiyonu) Matlab'de modellenmiş ve uzman görüşleri doğrultusunda kural tablosu oluşturulmuştur. Sonuç olarak parametre değerlerinden birinin diğer parametrelere göre yüksek olduğu durumlarda bulanık HTEA yöntemi geçerli bir etkin planı oluşturabilmektedir. Elde edilen sonuçlar, bulanık mantık yaklaşımının HTEA yönteminin zayıflıklarından biri olan parametre değerlerinin eşit önemde değerlendirilmesi durumunda etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, veri setinin daha hassas hazırlandığı (olasılık parametresi sadece iki değerden birini almaktadır) durumlar için uygulanarak sonuçlar yorumlanabilir. Kullanılan kural tablosu sadece tek bir uzman görüşüyle hazırlanmıştır. Bunun yerine birden fazla uzman görüşü alınarak daha hassas bir kural tablosu oluşturulabilir. Ayrıca HTEA yöntemi her çalışma alanına uygulanabilen bir risk analiz yöntemidir. İSG kapsamında sorun yaşanan imalat dışındaki birimlerde de yöntem uygulanabilir.

## Veri Paylaşımı

Çalışmada kullanılan veri seti ve sonuçlar GitHub platformu üzerinden paylaşılmıştır. Aşağıdaki bağlantı adresinden veri seti ve sonuçlara erişilebilir:

[https://github.com/nlgibi/Paylasilan\\_Arastirma\\_Dosyaları.git](https://github.com/nlgibi/Paylasilan_Arastirma_Dosyaları.git)

## Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veri seti Kayseri'de faaliyet gösteren bir mobilya firmasından temin edilmiştir. Firma yöneticilerine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Orhan Ü. İş Sağlığı ve Güvenliği Hizmetlerinin devlet tarafından desteklenmesi. Sakarya Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 2021, 9(2): 149-164.
- [2] Güngör E, İş sağlığı ve güvenliği kavramının toplam kalite yönetimi açısından irdelenmesi ve talaşlı üretim sanayisinde iş sağlığı ve güvenliği üzerine bir araştırma. Doktora, Marmara Üniversitesi 2008.
- [3] Aydan M, Kaya S. Hata türü ve etkileri analizi (HTEA): üniversite hastanesinde bir uygulama. Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 2017, 20(4): 475-502.
- [4] Li F, Zhang L, Dong S, Xu L, Zhang H, Chen L. Risk assessment of bolt-gasket-flange connection (BGFC) failures at hydrogen transfer stations based on improved FMEA. Int J Hydrogen Energy, 2023.
- [5] Çağlar E, Arıca F. Geçici hayvan bakımevleri için hata türleri ve etkileri analizi (FMEA) örneği. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 8(3): 313-321.
- [6] Erdil A. Evaluation of the sustainability of party logistics service providers with failure modes and effects analysis method: application in a company. Journal of Management Marketing and Logistics, 2023, 10(3): 98-114.
- [7] Kazan C. A. Cost optimization with internet supported FMEA and fuzzy FMEA analysis. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2023, 10(2): 950-970.
- [8] Yorulmaz M, Yeğin AO. Liman işletmelerinde tehlikeli madde elleçlenmesine ilişkin Fine-Kinney ve FMEA yöntemleri ile risk analizi. R&S-Research Studies Anatolia Journal, 2023, 6(1): 1-37.
- [9] Önder S, Önder M, Çiçek F. Hata türü ve etkileri analizi yöntemi ile bir mermer fabrikası'nda risk değerlendirmesi. MT Bilimsel, 2022, 22: 13-24.
- [10] Birgören B, Yalçınkaya M. İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesinde hata türleri ve etkileri analizinin (FMEA) kullanımı. International Journal Of Engineering Research And Development, 2019, 11(1): 41-50.
- [11] Hasar M, Yalçınkaya N. Üretim Sektöründe Hata Türü ve Etkileri Analizi. İksad Yayınevi, 2021.
- [12] Zadeh LA. Fuzzy sets. Inf. Control, c. 8, sayı 3, ss. 338-353, 1965.
- [13] Testik OM, Tok Unlu E. Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories. Qual Reliab Eng Int. 39.2 (2023): 575-589.
- [14] Ünsal S, Alışkan İ. (2016). Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemlerine sahip bulanık mantık denetleyicilerin özgün yazılım ve araç kutusu performans analizi. Erişim Tarihi, 27, 2019.
- [15] International Labour Organization, <http://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm>. Erişim tarihi: "27.02.2024"
- [16] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Mobilya Sektörü İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi. <https://www.csgb.gov.tr/medias/7189/mob%C4%B0lya-sektoer%C3%BCnde-%C4%B0%C5%9F-sa%C4%9Fli%C4%9Fi-goezet%C4%B0m%C4%B0-rehber%C4%B0.pdf> Erişim tarihi: "27.02.2024"



## Noktasal Konağa Sahip Zıplayan Robotta Duruş Anında Dengenin Sağlanması

Halit Hülako<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Hakkari Üniversitesi, Hakkari, Türkiye

\*<sup>1</sup> halithulako@hakkari.edu.tr

(Geliş/Received: 06/01/2024;

Kabul/Accepted: 10/07/2024)

**Öz:** Bu çalışmada, yer ile noktasal bir temas yüzeyine sahip olan zıplayan düzlemsel dinamik bir robotun zıplama sonrasında devrilmeden dengesini koruması incelenmiştir. Robotun dengesini sağlamak için Reaksiyon Tekerleği kullanılmıştır. Zıplama sonrasında yere iniş anı simüle edilmiş ve robotun yere temas ettiği anda dengesini koruyarak istikrarlı bir duruş sergilemesi için Genetik algoritma kullanarak Pekiştirmeli Öğrenme (PÖ) yapısına benzer bir Yapay Zeka Ajanı oluşturulmuştur. Bu yöntemle zıplayan robot, gerçek zamanlı olarak dengelenme misyonu için eğitilmiş ve ardından robotun dengeleme işlemini başarıyla öğrendiği gözlemlenmiştir. Zıplayan robotun dinamik modellenmesi Matlab Simscape MultiBody (MSM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik Simülasyona ait grafiksel sonuçlar, dinamik robot modelinin, zıplamadan sonra devrilmeden dengesini 5 saniye boyunca başarıyla sürdürdüğünü ve istenen düzeltmeleri yapabileceğini Yapay Zeka'nın katkısıyla sergilediğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Zıplayan robot, E. pekiştirmeli öğrenme, reaksiyon tekeri.

### Maintaining Stability During Rest for Jumping Robot with Point Contact

**Abstract:** This study investigates a planar modelled dynamic jumping robot with a point ground contact surface. The aim is to maintain the robot's balance after jumping without tipping over. To achieve this, a Reaction Wheel is employed for stabilization. The landing moment after a jump is simulated, and an Artificial Intelligence algorithm similar to Reinforcement Learning (RL), which uses Genetic algorithm, is used to maintain a stable posture by maintaining balance at the moment the robot touches the ground. With this method, the jumping robot was trained for the stabilisation mission in real-time and then it was observed that the robot successfully learnt the stabilisation process. The jumping robot's dynamic modelling was carried out using Matlab Simscape MultiBody (MSM). The graphical results of the numerical simulation show that the dynamic robot model successfully maintains its balance for 5 seconds without tipping over after jumping and exhibits the ability to make the desired corrections with the contribution of Artificial Intelligence.

**Key words:** Jumping robot, E. reinforcement learning, reaction wheel.

### 1. Giriş

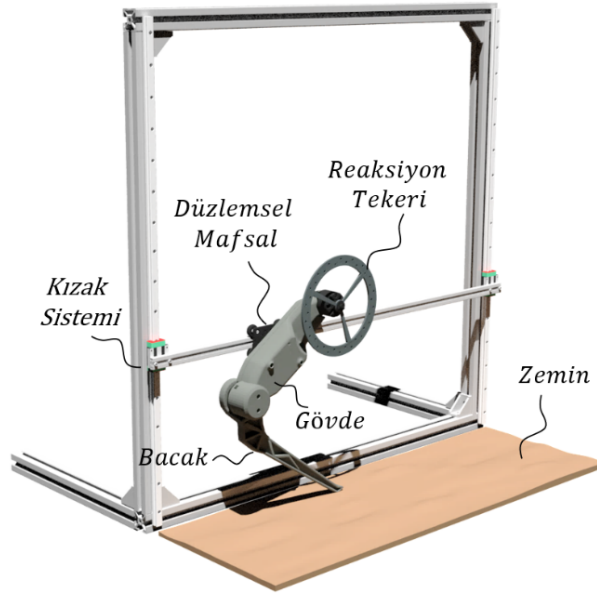
Statik kararlılık kriterlerinde robotun ağırlık merkezinin izdüşümü destek poligonu arasında yer alıyorsa robot devrilmeden dengeli duruş sağlayabilir fakat dinamik sistemlerde destek poligonu bulunmadığından robot dengeli sağlayabilmek için sürekli hareket etmelidir. Dinamik bir sistem olan zıplayan robotta da bacak noktasal bir şekilde yer ile temas ettiğinden dengeli sağlayabilmek için sürekli zıplama hareketi yapmak zorundadır. Robot durup beklediğinde ise devrilmektedir. Beş serbestlik dereceli (SD) düzlemsel bir robot, zıplama sonrasında denge sağlanıp kontrol edilmeye çalışılmıştır. Zıplamadığı esnada devrilmesini önlemek için çözüm olarak Reaksiyon tekeri kullanılmıştır. Robot, bir gövde ve tek eksenli bir bacadan oluşmakta ayrıca gövde üzerine yerleştirilen Reaksiyon Tekerleği vasıtasıyla eksik tahrikli olan ana gövde eksenlerinin hareketleri kontrol edilebilmektedir. Şekil 1'de gösterilen deney düzeneği Matlab Simscape Multibody ile modellenmiştir. Robot, dengeli sağlamak için Reaksiyon Tekerleği ve bacak eklemine bulunan eyleyiciyi kullanarak düşme etkisini kontrol eder.

Günümüzde reaksiyon tekerleri uzay teknolojisi gibi çok önemli alanlarda kullanılmaktadır. Genel olarak eyleyicinin doğrudan bağlanıp harekete geçirmenin mümkün olmadığı eksen takımlarında tercih edilen önemli bir yöntemdir. Çevresiyle sürekli temas halinde olan robotlar yönelimlerini kontrol edebilirken, temas ile hareketlendirmenin yetersiz olduğu yerlerde reaksiyon tekerlekleri tercih edilen bir yöntemdir. Günümüzde reaksiyon tekerlekleri uzayda serbest yüzen uyduların yönelimini kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [1], [2]. Yang, reaksiyon tekerlerinin uygulaması gereken momentum miktarını (Saturasyon kontrolü) yönetmek için uydularda da eyleyici olarak kullanılan manyetik tork bobinlerini kullanmıştır [3]. Benzer şekilde, bacaklı robotlarla ilgili bazı çalışmalarda, eksik tahrikli ana gövde üzerinde istenen yönelimleri elde etmek ve dengeli yürümeyi desteklemek için reaksiyon tekerli dinamik modeller oluşturulmuştur [4]. Lee vd. bir quadruped robotun stabilize ve denge kabiliyetini artırmak için reaksiyon tekerinden faydalanmışlardır. Model

\* Sorumlu yazar: [halithulako@hakkari.edu.tr](mailto:halithulako@hakkari.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-8194-5433.

tahmini kontrol tabanlı kontrolcü uygulanarak normalde 4 bacaklı robotların yapamadığı ince çizgi üzerinde yürüme işlemini başarmışlardır [5]. Bokser ve Manchester tek bacaklı reaksiyon tekerli zıplayan robotun indirgenmiş dinamik modeli, model tahmini kontrol ile toplam ağırlık merkezinin sinüzoidal bir referans yörüngesi takip etmesi istemişlerdir. Reaksiyon tekeri, robot referans yörüngesi takip ederken kontroldeki karmaşıklığı minimize ettiği ve robot dinamiğinin daha iyi kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir [6]. Çalışmamızda farklı olarak kütle merkezi için üretilen bir referans yörüngesi taktipten ziyade zıplama sonrasında farklı düşme senaryoları ile eğitilip zıplamadığı durumlarda dengeli duruşu korumaya odaklanmaktadır. Fakat zıplayan robot için uygulanan benzer bir sistem bulunmamaktadır. Zhang ve arkadaşları, reaksiyon tekerleği kullanarak robotik bir balığın yuvarlanma açısını kontrol etmeye çalışmışlardır [7]. Gajamohan ve arkadaşları yön değiştirebilen, zıplayabilen ve köşelerinde hassas açılarla durabilen üç eksenli bir küpü (Cubli) tepki tekerlekleri ile kontrol etmeyi başarmıştır [8], [9]. Benzer şekilde, reaksiyon tekerleri literatürde Unicycle olarak adlandırılan tek tekerlekli mobil araçların denge kontrolünü sağlamak için kullanılmıştır [10], [11]. Ayrıca, Trentin ve arkadaşları ters sarkaç sisteminin denge kontrolünü, çubuğun her iki ucunda reaksiyon tekerlekleri kullanarak modellemiş ve gerçekleştirmiştir [12].

Dinamik sistemler için hareket denklemleri genellikle Lagrange veya Newton-Euler yöntemleri kullanılarak türetilir. Ancak, yüksek serbestlik derecesine sahip karmaşık sistemler için hareket denklemleri yüzlerce satır matematiksel denklem ortaya çıkarabilir. Bu nedenle, denklemleri basitleştirmek için genellikle model indirgeme yöntemleri kullanılır. Yüksek serbestlik derecesine sahip karmaşık sistemlerin dinamik modelini elde etmeye yönelik bir yaklaşımda "Multibody Dynamics" simülasyon programlarının kullanılmasıdır [13]. Bir sistemin dinamik modelini elde etmek için, geleneksel matematiksel işlemler yerine Matlab Simscape MultiBody ile blok yapıları kullanılabilir. Bu, matematiksel bir model türetmeye gerek kalmadan sistemin dinamiklerinin hızlı bir şekilde oluşturulmasına olanak tanır. Ek olarak, Matlab Simscape MultiBody fiziksel bir ortam ve sistemin çalışmasına dair görsel animasyonlar sağlar.



**Şekil 1.** Dinamik modeli elde edilecek olan zıplayan robotun bağlı olduğu mekanizma düzeniği görünümü.

Bu makale, robotun modellenmesi ve dengeli duruş görevinin başarılı bir şekilde uygulanması da dahil olmak üzere birkaç bölüme ayrılmıştır. İkinci bölümde, zıplayan robotun kinematik ve dinamik modellenmesi yapılmış ve MSM ile elde edilen Dinamik Sistem Modeli yapısı verilmiştir. Zemin, yay ve sönümlenme elemanları kullanılarak modellenmiştir. Üçüncü bölüm, uygulanan empedans kontrolü de dahil olmak üzere denge görevinin uygulanmasında izlenen prosedürün ayrıntılarını vermektedir. Ayrıca, yere iniş sırasında devrilmeden dengeyi korumak için uygulanan öğrenme algoritmasının özelliklerini sunmaktadır. Dördüncü bölümde sayısal simülasyonlar sunulmakta ve grafiksel sonuçlar tartışılmaktadır. Beşinci bölümde ise sonuç ve araştırmacılar için çeşitli öneriler sunulmaktadır.

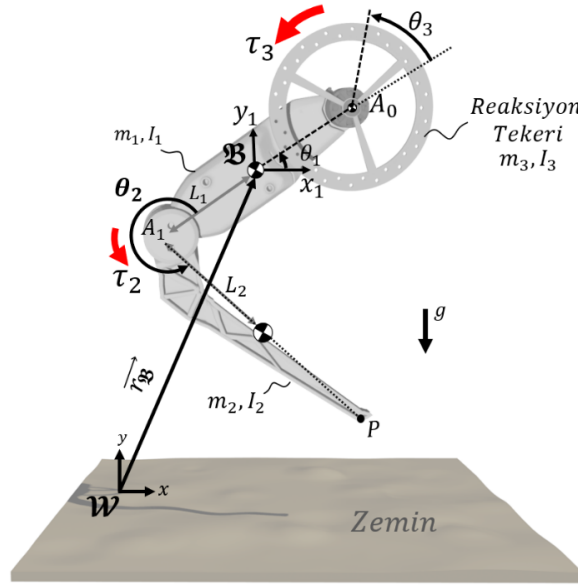
## 2. Kinematik ve Dinamik Modelleme

Şekil 2, reaksiyon tekerli robot modelinin kinematik ve dinamik gösterimlerinin yerleşimlerini göstermektedir. Robot üç rijit gövdeden oluşmaktadır.  $i \in \{1,2,3\}$  uzuv numaraları olmak üzere sırasıyla Ana gövde, bir SD'ye sahip bacak ve Reaksiyon tekerinden oluşmaktadır. Reaksiyon tekerleği ve bacak, döner mafsallar kullanılarak ana gövdenin iki ucuna bağlanmıştır.

Şekil 2'de, modelde  $A_0$  noktası ana gövde ile reaksiyon tekerleğinin bağlantı noktasını,  $A_1$  noktası ise ana gövde ile bacağın bağlantı noktasını temsil ettiğini göstermektedir. Düzlemsel dinamik robot modeli toplam 5 SD'ye sahiptir ve uzayda serbestçe hareket eder. Oluşturulan dinamik düzlemsel robot modeli genelleştirilmiş  $q \in \mathcal{R}^{n+3}$  koordinatlarını kullanmaktadır, burada "n" terimi tahrik edilen eklemleri temsil etmektedir. Genel haliyle, doğrusal olmayan hareket denklemi (Denklem 1) aşağıdaki gibidir:

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = S^T \tau + J^T f_c \quad (1)$$

Eylemsizlik matrisi  $M \in \mathcal{R}^{(n+3) \times (n+3)}$  ile temsil edilir ve  $h \in \mathcal{R}^{n+3}$  ise yerçekimi, Koriolis ve merkezci terimleri içerir. J ifadesi temas noktası için elde edilen Jakobiyen matrisini sağlarken,  $f_c$  robotun bacağı yerle temas halindeyken ortaya çıkan temas kuvvetlerini temsil etmektedir. Eksik tahrikli gövde eksenleri hariç, eklemlerdeki tork değerleri  $\tau \in \mathcal{R}^n$  ile temsil edilir. Seçim matrisi  $S^T$ , n tork değerini seçmek için kullanılan bir boolean matrisidir.

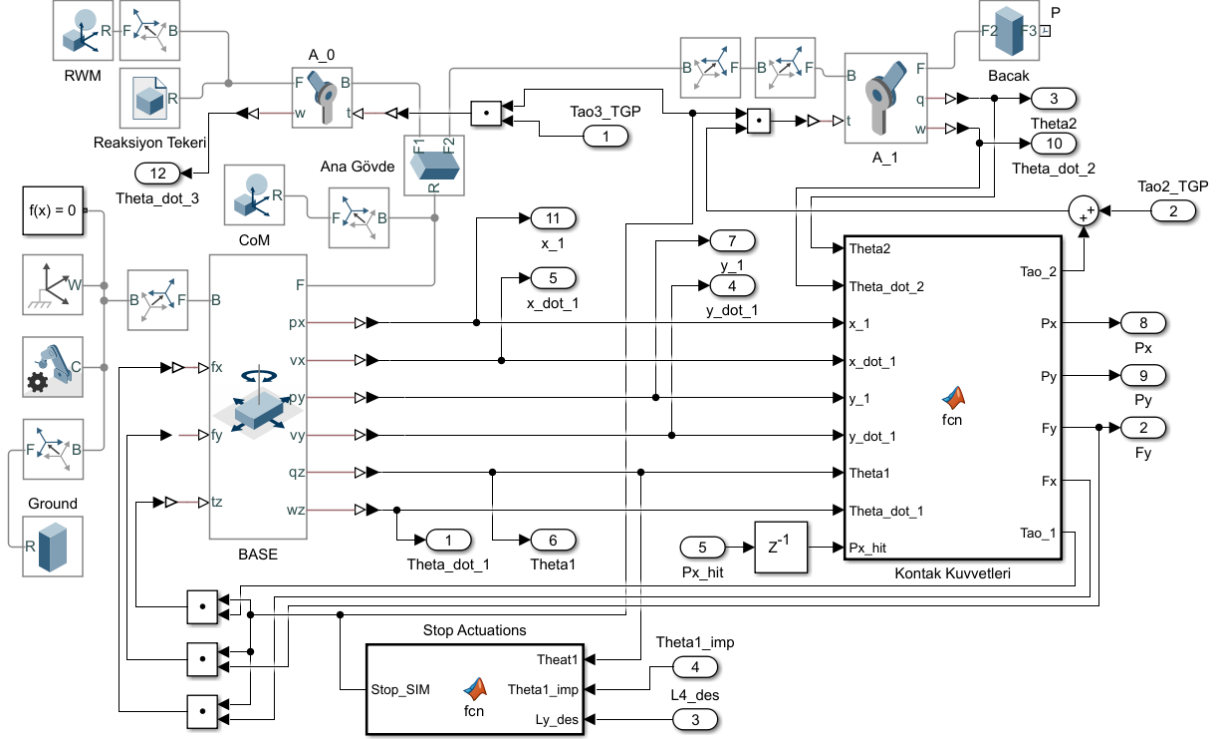


Şekil 2. Robot modeline ait kinematik ve dinamik gösterimler.

$L_1$  ana gövdenin merkezinden  $A_1$  eklemine kadar olan mesafeyi temsil ederken,  $L_2$  bacağın kütle merkezinden bacağın sonuna kadar olan mesafeyi temsil eder.  $P$  noktası bacağın alt kısmında bulunan ve yerle temas eden noktayı temsil etmektedir.  $\mathcal{W}(x, y)$  atalet eksen olarak tanımlanırken, hareketli olan ana eksen  $\mathcal{B}(x_1, y_1)$  robotun ana gövdesinin kütle merkezinde konumlandırılmıştır. Hareketli ana eksen  $\mathcal{B}$ 'nin sabit referans çerçevesine göre konumu  $r_{\mathcal{B}} \in \mathcal{R}^2$  ifadesiyle gösterilir. Ana eksenin açısal yer değiştirmesi  $\theta_1$  ile gösterilir.  $A_0$  ve  $A_1$  eklemlerinin açısal yer değiştirmeleri sırasıyla  $q \in \mathcal{R}^n = (\theta_2, \theta_3)$  ile temsil edilir.  $\theta_1$  yatay x ekseninden ölçülürken,  $\theta_2$  ve  $\theta_3$ ,  $\theta_1$ 'e bağımlı değişkenlerdir. Merkezler için kütle ve eylemsizlik momentleri sırasıyla  $m_i \in \mathcal{R}^3$  ve  $I_i \in \mathcal{R}^3$  ile temsil edilir.  $(x_1, y_1, \theta_1)$  eksik tahrikli gövdenin yön ve konumlarını verir. Eksik tahrikli olan ana eksenleri dolaylı olarak kontrol etmek için  $A_0$  ve  $A_1$  eklemlerine  $\tau \in \mathcal{R}^n$  torkları uygulamak gerekir.

Şekil 2'de gösterilen dinamik robot modeli, hareket denklemleri ile aynı sonuçları üretmek için MSM kullanılarak elde edilmiştir. MSM yapısı,

Şekil 3'te gösterildiği gibi Simulink ve Simscape blok diyagramları kullanılarak modellenmiştir. Robot modellenirken Şekil 1'de verilen robotun bağlı olduğu kızak elemanlarının ağırlıksız olduğu varsayılmıştır. Ayrıca gövde ve bacak, ağırlık merkezleri geometrik merkezlerinde olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 3. MSM ile oluşturulan Robot Dinamiği (RD) alt bloğu.

Katı nesnelere CAD programları gibi katı modelleme yazılımları kullanılarak oluşturulabilir veya doğrudan MSM'nin hazır kütüphanesinden eklenebilir. MSM simülasyon programı temel olarak eklem tiplerini, katı cisim modellerini ve eksenleri istenen noktalara tanımlamak için kullanılan Rigid Transform bloklarını temsil eden birbirine bağlı blok diyagramlarından oluşur. Robotun gövde merkezinde bulunan 3-DOF "B" için Base adında düzlemsel bir mafsallı kullanılmıştır.

Ana gövde üst ucu olan  $A_0$ 'a tek serbestlik dereceli bir döner mafsallı kullanarak reaksiyon tekerine bağlanmışken, Bacak bloğu tek serbestlik dereceli bir döner mafsallı kullanarak ana gövdenin alt ucu olan  $A_1$ 'e bağlanmıştır. MSM'de,  $A_1$  döner eklemi için yapısal olarak bulunduğu varsayılan  $0,005 \text{ Nm}/(\text{deg}/\text{s})$  değerinde sönümleme miktarı tanımlanmıştır. Bu bileşenler için dinamik parametreler Ana Gövde, Reaksiyon Tekerleri ve Bacak bloklarına girilmiştir. Kontak Kuvvetleri fonksiyon bloğu, robotun bacağı zeminle temas ettiğinde ortaya çıkan temas kuvvetlerini hesaplar. Ortaya çıkan tork kontrol sinyalleri daha sonra reaksiyon tekerlerine ve bacağına bağlı olan  $A_0$  ve  $A_1$  eklem bloklarına gönderilir. Dinamikleri sağlayan ana yapı tamamlandıktan ve sistem analizi başlatıldıktan sonra, fiziksel ortamda çalışan mekanik modelin animasyonu elde edilmiş olur. MSM'de robotun dinamiğini veren ana yapıya ek olarak kontrolör fonksiyonları eklenerek aynı ortam içerisinde bir geri besleme sistemi oluşturmak mümkündür. Gerçek zamanlı öğrenme denemeleri sırasında kötü ilerleyen dengeleme işlemlerini sonlandırmak için Stop Actuation (SA) bloğu eklenmiştir.

## 2.1 Jakobiyen ve Kontak Modelleme

Robot bacağının yer ile temas yüzeyinin bir nokta olduğu varsayılmaktadır.  $P = [P_x \ P_y]^T \in \mathbb{R}^2$  noktasının atalet eksenine göre konumu,  $P_x$  ve  $P_y$  değerleri sırasıyla Denklem 2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} P_x &= x_1 - L_1 \cos(\theta_1) + 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ P_y &= y_1 - L_1 \sin(\theta_1) + 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

P konum vektörü için elde edilen  $J_P$  Jacobian ifadesi aşağıda verilmiştir (Denklem 3);

$$J_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & L_1 \sin(\theta_1) - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 1 & -L_1 \cos(\theta_1) + 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

P noktasına etki eden dikey ve yatay kontak kuvvetleri Denklem 4'te verilmiştir.

$$f_c = \begin{cases} [(k_c^x (P_x^{hit} - P_x) - b_c^x \dot{P}_x) & (-k_c^y P_y - b_c^y \dot{P}_y)] & \text{if } P_y < 0 \\ [0 \ 0] & \text{if } P_y \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

P noktasında meydana gelen temas kuvvetleri  $f_c = [f_c^x \ f_c^y]^T \in \mathcal{R}^2$  ile temsil edilir. Zeminin yatay ve dikey yönlerdeki mekanik sönümlenme ve yay elemanları olarak modellenir. Ayak ucunun zeminle temas anında atalet eksenine göre x eksenindeki konumu  $P_x^{hit}$  ile gösterilir. Zeminin sertliği  $k_c \in \mathcal{R}^2 = (k_c^x \ k_c^y)$  terimi ile temsil edilirken, zeminin sönümlenme katsayısı  $b_c \in \mathcal{R}^2 = (b_c^x, b_c^y)$  ile temsil edilir.  $k_c$  ve  $b_c$  değerleri düşme testleri ile belirlenmiştir.  $\dot{P} \in \mathcal{R}^2$ , ayak ucu noktası P'nin zamana göre birinci türevi Denklem 5'te verilmiştir.

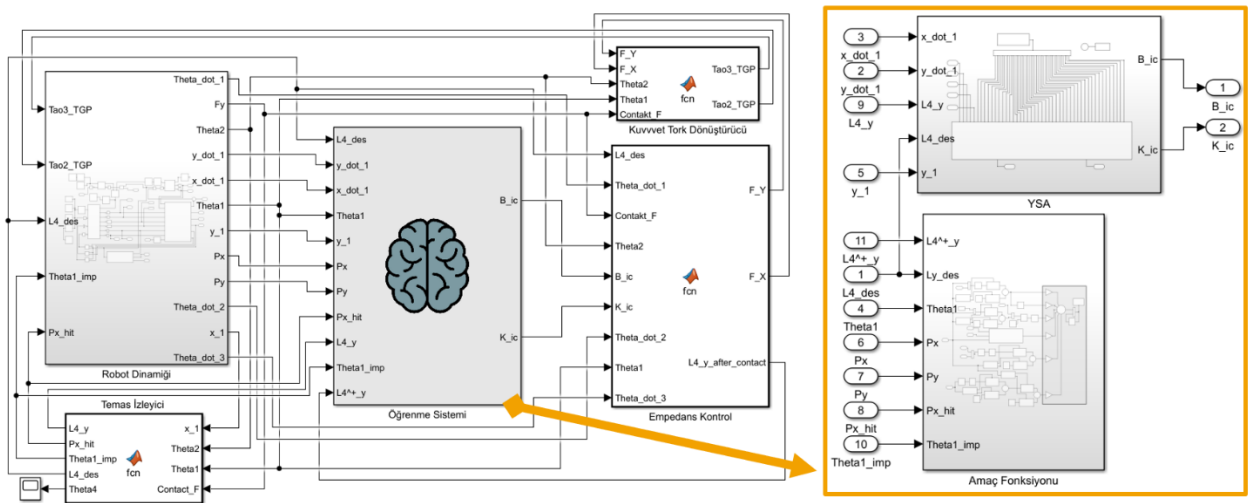
$$\dot{P} = J_P [x_1 \ y_1 \ \theta_1 \ \theta_2]^T \quad (5)$$

P noktası yere temas ediyorsa, kayma olmadığı ve  $\dot{P}(t) = 0$  olduğu varsayılır.

### 3. Dengeleme Prosedürü ve Kontrol Yapısı

Bu bölümde robotun yere temas ettiği ana odaklanılmaktadır. Robotun çarpma anında devrilmesini önlemek ve dengeli bir duruşu korumak için gerçek zamanlı bir öğrenme yapısı geliştirilmiştir. Yapı, inişin darbe kuvvetlerini etkili bir şekilde emerken aynı zamanda robotun dengesini korumayı öğrenerek, düşmeden dengede kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Robot daha sonra nihai konumuna ilerlerken MSM tarafından oluşturulan, robot ve çevresini de içeren öğrenme ve aşamalarının da olduğu tam kontrol yapısı

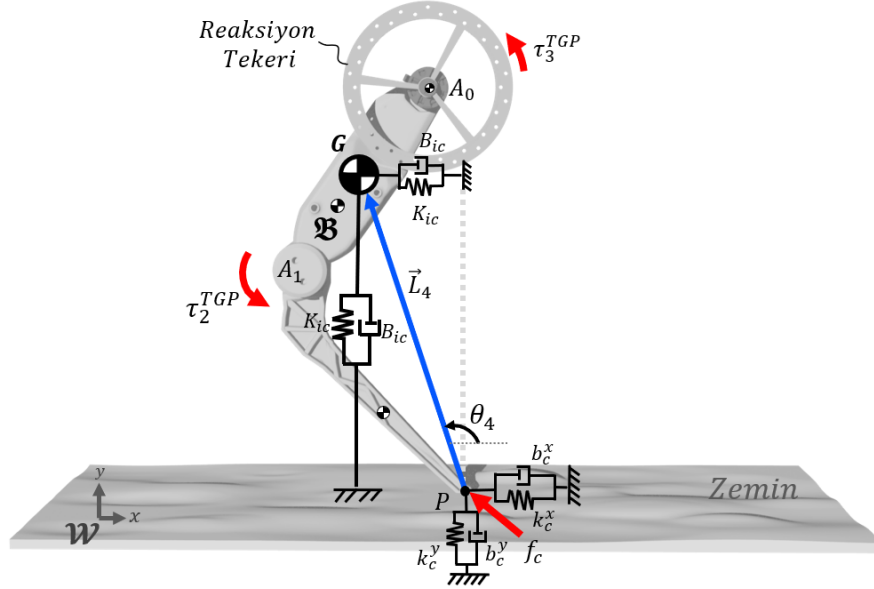
Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu entegre yapı, yerle teması sırasında etkili bir kontrol ve öğrenme sürecini yönetir.



Şekil 4. Robot için MSM ana kontrol mimarisi.



Robot Dinamiği (RD) bloğu, robotu ve çevreyi modelleyen blok mimarisini göstermektedir. Empedans Kontrol (EK) bloğu, uygulanan empedans kontrolüne ait kontrol algoritmasını barındırmaktadır. Öğrenme Sistemi (ÖS) öğrenmeyi gerçekleştirir ve kontrol katsayılarını belirler. ÖS alt blokları sırasıyla YSA ve Amaç Fonksiyonu (AF) olarak adlandırılan Sinir Ağı ve Amaç fonksiyonu için blok yapıları içerir. Temas İzleyici (Tİ) bloğu yere iniş anındaki durum bilgilerini diğer bloklara iletir. RD bloğundan alınan durum gözlemleri diğer blok yapılarını besler. Komple kontrol yapılarından elde edilen aksiyon çıkışları ise RD bloğuna girer.



Şekil 5. Robot yer ile temasıyla başlayan Kartezyen impedans kontrol.

Robotun düşme etkilerini sönümlenmesi, devrilmesini önlemesi ve dengeyi geri kazanması için adaptif empedans kontrolü uygulanmıştır. Bu yaklaşım, robotun dış kuvvetlere tepkisini kontrol etmek, dengeyi sağlamak ve salınım özelliklerini gerektiği gibi ayarlamak için çok yönlü bir yöntem sunar. Şekil 5,  $L_4$  vektörünün uzunluğunun ve açısının yatay ve dikey eksenlerde tanımlanan yay ve sönüm elemanları tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Bu kuvvetler robota etki ederek yay sönümlenme hareketini taklit etmesini sağlar [14]. Yayın sertlik değeri ve sönümlenme katsayısı, istenen salınım türünü elde etmek için ayarlanabilir. Şekil 5'te gösterilen  $L_4 \in \mathbb{R}^2$  vektörü için kapalı döngü vektör Denklemi 6'daki gibi üstel formda karmaşık sayılarla yazılabilir ve bu da iki 2 adet skaler denklem türetir. Vektörün uzunluğu ve birinci türevi sırasıyla Denklem 7 ve Denklem 8'de,  $\theta_4$  açısı ise Denklem 9'da verilmiştir.

$$\overrightarrow{GA_1} + \overrightarrow{A_1P} + \overrightarrow{PG} = 0 \quad (6)$$

$$\overrightarrow{PG} = -L_G e^{i(\theta_1 + \pi)} - 2L_2 e^{i(\theta_1 + \theta_2)} \quad (7)$$

$$L_4^x(\theta_1, \theta_2) = L_G \cos(\theta_1) - 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$L_4^y(\theta_1, \theta_2) = L_G \sin(\theta_1) - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$V_4 = iL_G \dot{\theta}_1 e^{i(\theta_1)} + i2L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) e^{i(\theta_1 + \theta_2)} \quad (8)$$

$$L_4^y = L_G \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) - 2L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$L_4^x = -L_G \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + 2L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left( \frac{L_G \cos(\theta_1) - 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{L_4} \right) \quad (9)$$

$L_4^x$  ve  $L_4^y$  sırasıyla yatay ve dikey eksenlerdeki bileşenleri temsil etmektedir. Yer ile temas aşaması sırasında amaç  $\theta_4$  açısını  $\pi/2$  radyanda sabitlemek ve çarpma sırasında  $L_4$  uzunluğunu önceden belirlenmiş bir değerde tutmaktır. Kontrol, bir öğrenme algoritması kullanılarak düşüş denemeleri yoluyla sistemin öğrenilmesiyle

sağlanır. Bu aşamada kararlı bir duruş elde edildiğinde, sistem  $\theta_4$  açısını aynı değerde tutmaya çalışır. Denklem 10 ve 12, empedans kontrolü ile yatay ve dikey eksenlerde uygulanan kuvvet bileşenlerini sağlar.

$$L_4^{xeq} = L_4^{xeq} + \zeta_w \dot{\theta}_3 \quad (10)$$

$$F_{ic}^x = (L_4^{xeq} - L_4^x) K_{ic} - \dot{L}_4^x B_{ic} \quad (11)$$

$$L_4^{des} = \{ L_4^y(t_{imp}) \text{ if, } \text{sign}(f_c) > 0 \quad (11)$$

$$F_{ic}^y = (L_4^{des} - L_4^y) K_{ic} - \dot{L}_4^y B_{ic} \quad (12)$$

Hem yatay hem de dikey yönlerde kullanılan sanal empedans olan  $B_{ic}$  ve  $K_{ic}$  kontrol katsayıları, yapay sinir ağlarından elde edilmiştir. Bu katsayılar, robotun yerden yüksekliği, yatay ve dikey eksenlerdeki hızları gibi rastgele başlangıç koşulları ile YSA tarafından eğitilmiş ve belirlenmiştir. Geçiş aşamasında x ve y yönleri için istenen referans değerler sırasıyla  $L_4^{xeq}$  ve  $L_4^{des}$ 'tir.  $L_4^{xeq}$  ifadesi Denklem 10'daki ilk satırda belirlenmiştir. Reaksiyon tekerinin hız limitlerinin üzerine çıkmasının engellenmesi veya doyum noktasına yaklaşılmasının engellenmesi gerekmektedir [15]. Bu sebeple, yatayda kontrolcünün takip ettiği referans değer için reaksiyon tekerinin açısız hızına bağlı bir yörünge tanımlanmıştır. Burada  $\zeta_w$  ifadesi referansın büyüklüğüne etki eden bir katsayı çarpandır.  $L_4^{des}$  ise Denklem 11'de belirtildiği gibi  $t_{imp}$  çarpma anındaki  $L_4^y$  uzunluğuna eşittir. Sabit çözücü (Solver) aralığı  $t_{int}$  olarak gösterilir.

Ortaya çıkan empedans kuvvetleri, reaksiyon tekerini ve ikinci uzvu tahrik eden tork aksiyon sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyaller Denklem 13'te sunulan denklemlerden türetilir.

$$\begin{aligned} \tau_2^{TGP} &= F_{ic}^x L_G \sin(\theta_1) + F_{ic}^y L_G \cos(\theta_1) \\ \tau_3^{TGP} &= F_{ic}^x L_4^y + F_{ic}^y L_4^x \end{aligned} \quad (13)$$

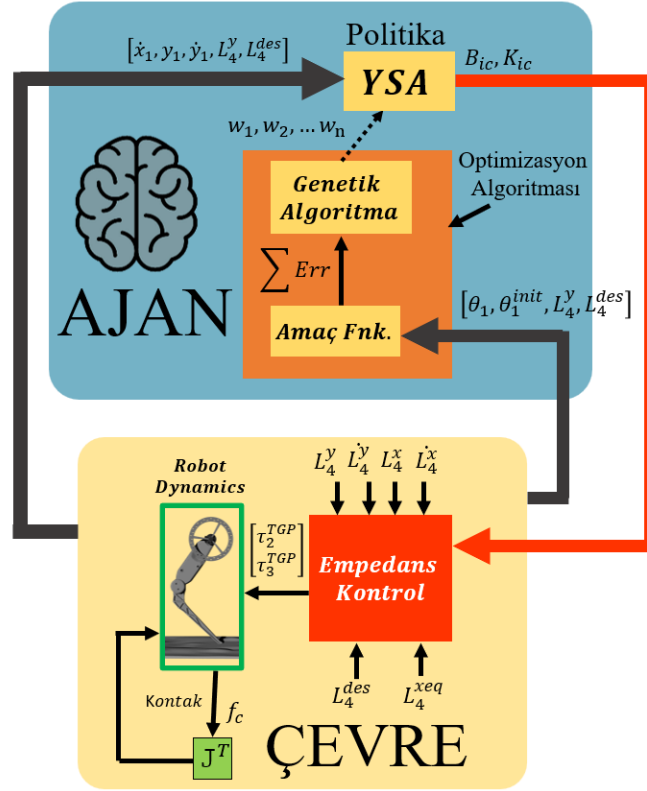
Kontrol sırasında  $\tau_2^{TGP}$  ve  $\tau_3^{TGP}$  sırasıyla A\_1 ve A\_0 bloklarına tork uygular. Empedans kontrol bloğu, YSA bloğundan  $K_{ic}$  ve  $B_{ic}$  çıkış değişkenlerini alır ve bunları Kuvvet-Tork Dönüştürücü (KTD) bloğunda kontrol torklarına dönüştürür.

### 3.1 Öğrenme Algoritması

Bu sistemde, genetik algoritma bir optimizasyon algoritması olarak görev yaparken, yapay sinir ağı politikası bir ajanın davranışını temsil eder. Ajan, çevresiyle etkileşime geçerek görevini öğrenmeye çalışır. Yapay Sinir Ağı veya Politika, ajanın çevresiyle etkileşimde bulunarak elde ettiği gözlem verilerini kullanarak bir eylem üretir. Yapay sinir ağı, genetik algoritma tarafından optimize edilir, böylece ajanın performansını artırmak için en iyi parametre setine evrilir. Bu sistemde genetik algoritma ve yapay sinir ağı birlikte çalışarak, ajanın öğrenmesini ve performansını sürekli olarak iyileştirmesini sağlar. Bu tasarım Evrimsel Pekiştirmeli Öğrenme olarak adlandırılabilir. Bu yöntemde farklı olarak, PÖ'deki Ajan, ödül değerini artırmaya çalışırken, bizim oluşturduğumuz sistemde Ajan, Amaç fonksiyonunu sifıra yaklaştırmaya çabalamaktadır. Ayrıca, Ajan' a tüm gözlem verileri girilmesi yerine kritik olan veriler girilmiştir. Ayrıca Politikaya aktör olarak toplam beş girdi, beş ara katman ve iki çıktı hücrelerinden oluşan YSA yapısı kullanılmış ve Kritik için oluşturulan sinir ağı yapısı devre dışı bırakılmıştır. Belirlenen sinir hücresi sayısı toplamda 42 adet ağırlık katsayısı üretmektedir. Buda robotun durum girdilerine karşılık cevap olarak verdiği tepkilerde yeterli miktarda doğrusalsızlık sağlayacağından ağırlık katsayısı sayısı yeterli görülmüştür. Ağırlık katsayıları,  $n \in \{1, \dots, 42\}$  olmak üzere  $w_n$  ile temsil edilir ve Genetik algoritma aracılığıyla her atıştan sonra gerçek zamanlı olarak güncellenir. Hücrelerde kullanılan aktivasyon fonksiyonu "tansig"dir. Eğitim aşamasında, Aktör girişi dinamik modelin  $\dot{x}_1, y_1, \dot{y}_1, L_4^y$  ve  $L_4^{des}$  durum değişkenlerini alır ve çıkışta, düşme etkilerini etkin bir şekilde sönmölemek için  $B_{ic}$  ve  $K_{ic}$  empedans kontrolü için gerekli terimleri sağlar. Bu amaçla kullanılan öğrenme yapısı

Şekil 6'da gösterilmektedir. Simülasyon, YSA ağırlık katsayılarını belirlemek için Matlab Genetik algoritma araç kutusunu kullanır. Sistemimiz için hedeflenen amaç fonksiyonu Denklem 14'te verilmektedir.  $\psi$  terimi, atış denemelerinde kötü sonuçlanan denge kayıpları nedeniyle düşmeyi cezalandırmak için eğitim sırasında eklenir.  $\theta_1^h$  terimi robotun yerle temas ettiği andaki  $\theta_1(t_{imp})$  değerine eşittir ve  $L_4^{des}, L_4^{xeq}$  robotun o andaki dikey ve yatay açıklığını temsil eder. Politika girişine verilen durum değişkenleri değişmiş olsa da çarpışmadan sonra robotun sırasıyla  $L_4^{des}, L_4^{xeq}$  değeri etrafında  $L_4^y$  ve  $L_4^x$ 'i dengelemesi gerekmektedir. Büyük çarpma kuvvetlerine rağmen

yatay yönde maksimum  $\xi$  değerine kadar yer değiştirmeye izin verilmesi istenmiş ve bu sınır aşıldığında Ajanın karar vermesinde etkili olacak büyüklükte cezalandırmalar başlar. İlk terim olan  $\max(0, |L_4^{des} - \xi - L_4^y|^2)$ , maksimum bacak kapanma miktarı olan  $\xi$ 'yi aştığında, yerle temas anındaki çarpma etkisinden dolayı yüksek ceza puanı almaya başlar.  $|L_4^{des} - L_4^y|$  ifadesi robotun denge noktasına dönmeye yardımcı olurken,  $(L_4^{des} - L_4^y)^2$  ifadesi hedef yükseklik ile arasındaki farkı en aza indirir.  $(P_x^{hit} - P_x)^2$  ve  $\lambda_6 P_y^2$  terimleri çarpışmalardan sonra zıplamayı ve yer değiştirmeyi önlemek için eklenmiştir.  $\lambda_j$   $j \in \{1, \dots, 6\}$  ağırlık faktörleridir ve değerleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir.



Şekil 6. Gerçek zamanlı robot eğitim döngüsü.

$\tau_k^{TGP}$ ,  $k \in \{2, 3\}$  Maksimum kontrol torku  $\pm u_k^{max}$  ile sınırlıdır. Bu nedenle, Denklem 16'da verilen koşullar uygulanmıştır. Robotun fırlatılması sırasında başlangıç koşullarının kontrol edilebilir sınırlar içinde olmasını sağlamak için, fırlatma simülasyonlarında  $\theta_1$  için başlangıç değerlerinin  $\pi/3 < \theta_1 < 13\pi/18$  aralığında olduğu varsayılmıştır. Buna uygun olarak belirlenen aralıkta bir değer seçilmiştir.  $\dot{y}_1$  için başlangıç değerlerinin;  $\dot{y}_1^{min} < \dot{y}_1 < \dot{y}_1^{max}$  m/s aralığında olduğu varsayılmaktadır.  $y_1$  ve  $\dot{x}_1$  için sırasıyla  $y_1^{min} < y_1 < y_1^{max}$  ve  $\dot{x}_1^{min} < \dot{x}_1 < \dot{x}_1^{max}$  m/s'dir.

$$\text{Err} = \min \sum_{\theta=0}^{\frac{T_{train}-1}{t_{in}}} \left( \lambda_1 \cdot \max(0, |L_4^{des} - \xi - L_4^y|^2) + \lambda_2 |L_4^{des} - L_4^y| + \lambda_3 (L_4^{des} - L_4^y)^2 + \lambda_4 \Psi \right. \quad (14)$$

$$\left. + \lambda_5 (P_x^{hit} - P_x)^2 + \lambda_6 P_y^2 \right) \quad (15)$$

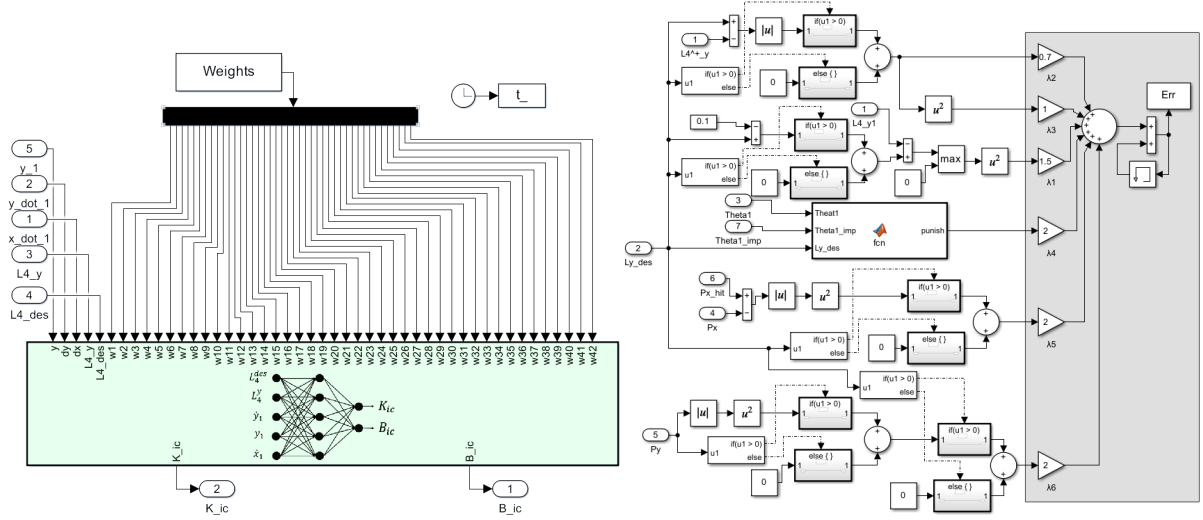
$$\Psi = \begin{cases} (\theta_1 - \theta_1^h)^2, & \text{if } (\theta_1^h < \frac{\pi}{2}) \text{ and } (-\frac{\pi}{5} > \theta_1 > \frac{\pi}{2}) \text{ and } (L_4^{des} > 0) \\ (\theta_1 - \theta_1^h)^2, & \text{if } (\theta_1^h > \frac{\pi}{2}) \text{ and } (-\frac{5\pi}{6} > \theta_1 < \frac{\pi}{2}) \text{ and } (L_4^{des} > 0) \end{cases}$$

$$s. t. \begin{cases} y_1^{min} \leq y_1 \leq y_1^{max} \\ \dot{y}_1^{min} \leq \dot{y}_1 \leq \dot{y}_1^{max} \\ \dot{x}_1^{min} \leq \dot{x}_1 \leq \dot{x}_1^{max} \\ \tau_k = \begin{cases} u_k^{max} \frac{|\tau_k|}{\tau_k}, & \text{if } |\tau_k| > u_k^{max} \\ \tau_k, & \text{if } |\tau_k| \leq u_k^{max} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

Simulink blokları ile modellenen AF alt bloğu,

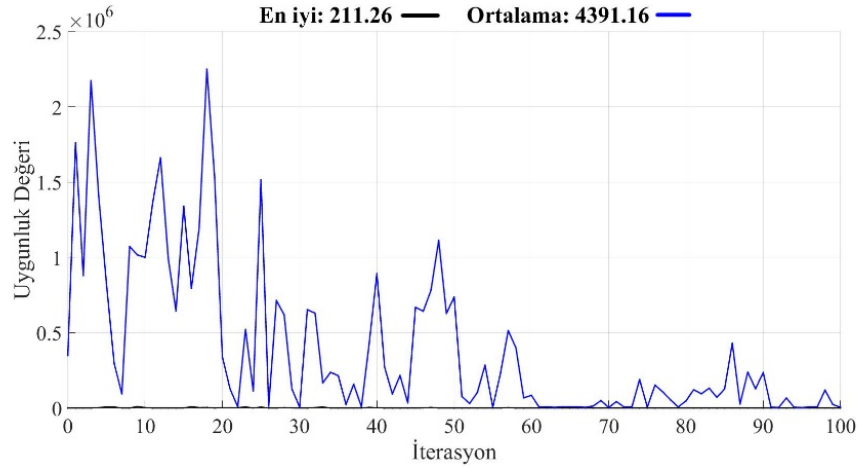
Şekil 7'de (sağda) gösterilmektedir. Her fırlatma denemesinde Genetik Algoritma,

Şekil 7'de (solda) gösterildiği gibi yeni YSA ağırlık katsayılarını test için MS ortamına aktarır. Simülasyon boyunca, AF'den elde edilen toplam hata Err bloğu aracılığıyla Genetik Algoritmaya verilir. Dolayısıyla, her simülasyon sırasında amaç fonksiyonu sıfıra yaklaştıkça, yere konduktan sonraki denge süreci öğrenilir ve bir sonraki simülasyonda daha iyi sonuçlar elde edilmesi için yeni katsayılarla test edilir. Bu gerçek zamanlı öğrenme döngüsü, önceden belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşılan veya istenen performans aralığına ulaşılan kadar devam eder. Eğitim için seçilen örnekleme zaman aralığı Err bloğuna girilir.



Şekil 7. YSA (Sol), AF (Sağ) alt sistem blok yapıları.

Genetik Algoritma, 100 iterasyon ve 10 popülasyon büyüklüğü ile ayarlanmıştır.  $y_1$ ,  $\dot{y}_1$ ,  $\dot{x}_1$  için simülasyon başlangıç koşulları Denklem 16'da belirtilen aralıkta rastgele seçilmektedir. Eğitim denemeleri boyunca  $\theta_1$  ve  $\theta_2$ 'nin belirlenen bir açıda yere indiği varsayılmıştır. Simülasyon için Çözücü sabit örnekleme süresi  $t_{int} = 1e - 4$  sn olarak ayarlanmış ve Çözücü "ode4 (Runge-Kutta)" olarak seçilmiştir. Eğitim için örnekleme aralığı  $t_{in} = 0,01$  sn olarak seçilmiştir. Her bir eğitim denemesi için toplam simülasyon süresi  $T_{train} = 1,40$  saniyedir. Bu süre sonunda Ajan, toplam hataya göre, Aktör'de bulunan YSA sinir yapısındaki katsayılarla karar vermektedir. Robotun eğitime süreci Matlab 2022 kullanılarak Intel Core i7 işlemci ile donatılmış bir sistem üzerinde yürütülmüştür. Öğrenme sürecini tamamlamak için toplam 1000 adet düşme denemesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8, YSA parametrelerini tahmin ederken performans değerlerini listeleyen Genetik Algoritmayı göstermektedir. Grafikten, yapay zeka ajanının 60. jenerasyondan sonra daha uygun kontrol kararları alabildiği görülebilmektedir.



Şekil 8. İterasyonlar Sırasında Dinamik Sistemin Öğrenme Durumu.

Burada “En İyi” her bir iterasyonda veya nesilde, genetik algoritma tarafından bulunan en iyi çözümün veya en düşük amaç fonksiyon değerini ifade eder. “Ortalama” ifadesi ise her iterasyonda veya nesilde, popülasyondaki tüm çözümlerin bir ortalama değeri, amaç fonksiyonunun ortalaması veya uygunluk değerinin ortalaması şeklinde ifade edilebilir. “Uygunluk değeri”, Her bir bireyin veya çözümün, genellikle bir amaca veya bir uygunluk fonksiyonuna dayanarak ölçülen uygunluk derecesini ifade eder. “İterasyon”, nesil olarak ta ifade edilebilir. Her nesil, bir önceki nesilden türetilen bireylerin evrimleştiği ve yeni bireylerin oluşturulduğu bir aşamadır. En iyi ve ortalama değerler, algoritmanın performansını değerlendirmek için özellikle önemlidir, çünkü bu değerler optimizasyon ilerlemesini ve çözüm kalitesini gösterir.

#### 4. Sayısal Simülasyon

Simulink modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal simülasyonların sonuçları, dengelemeyi test etmek için geliştirilen kontrol yapısını içermektedir. Robotun kontrolü için gerekli parametreler ve gerçekleştirilen simülasyonlar için başlangıç değerleri Tablo 1 ve 2’de verilmiş olup, bu parametreler Simulink modelindeki ilgili bloklarda tanımlanmıştır.

Tablo 1. Kontrol ve Robot dinamiği parametreleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
$L_1(m)$	0,2	$\lambda_1$	1,5	$y_1^{min}(m)$	0,2
$L_2(m)$	0,2	$\lambda_2$	0,7	$y_1^{max}(m)$	0,3
$m_1(kg)$	0,63	$\lambda_3$	1	$\dot{y}_1^{min}(m/s)$	0
$m_2(kg)$	$3 \times 10^{-2}$	$\lambda_4$	2	$\dot{y}_1^{max}(m/s)$	0,7
$m_3(kg)$	$14 \times 10^{-2}$	$\lambda_5$	2	$\dot{x}_1^{min}(m/s)$	0
$g(m/s^2)$	9,80665	$\lambda_6$	2	$\dot{x}_1^{max}(m/s)$	0,5
$I_1(kgm^2)$	$2,47917 \times 10^{-3}$	$\xi(m)$	0,1	$u_2^{max}(Nm)$	20
$I_2(kgm^2)$	$1,00563 \times 10^{-4}$	$b_c^y(N/ms^{-1})$	$2 \times 10^2$	$u_3^{max}(Nm)$	15
$I_3(kgm^2)$	$1,5931 \times 10^{-4}$	$t_{ref}(sec.)$	2	$L_4^{xeq}(m)$	0
$k_c^y(N/m)$	$10^5$	$k_c^x(N/m)$	$10^3$	$b_c^x(N/ms^{-1})$	$10^2$

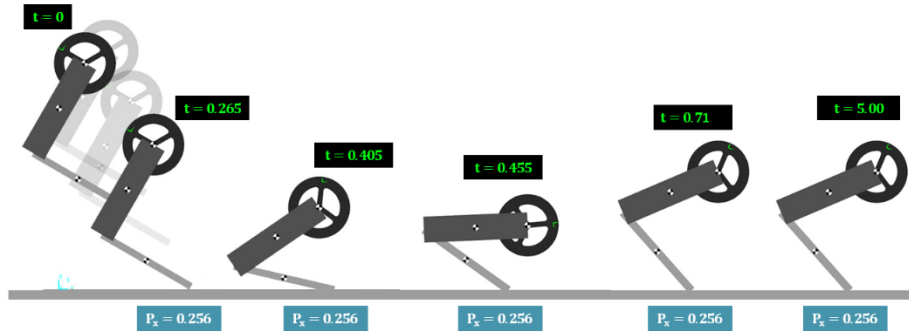
Eğitim sonunda reaksiyon tekerli sisteminin robot üzerindeki performansını değerlendirmek için rastgele başlangıç değerleri seçilip nümerik simülasyon gerçekleştirilmiştir. Fırlatma testi için pozisyon ve hızların başlangıç değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Simülasyonun başlangıcında ( $t = 0$ ), reaksiyon tekerleği hareketsizken, robot aşağıda verilen başlangıç açısız ve doğrusal konumlarında ve hızlarında başlatılmıştır.

**Tablo 2.** Simülasyon için başlangıç değerleri.

	$x_1$	$y_1$	$\dot{x}_1$	$\dot{y}_1$	$\theta_1$	$\dot{\theta}_1$	$\theta_2$	$\dot{\theta}_2$	$\theta_3$	$\dot{\theta}_3$
Rastgele Başlangıç Değerleri ( $t = 0$ )	0 m	0,35 m	0,5 m/s	0,7 m/s	1,047 rad	0 rad/s	4,71 rad	0 rad/s	0 rad	0 rad/s

Simülasyonlar sırasında maksimum kontrol torkları  $\tau_3$  ve  $\tau_2$  denklem (16)'da verildiği gibi kısıtlanmıştır. Robotun fırlatılması ve dengelenmesi sırasında alınan simülasyon ekran görüntüsü

Şekil 9'da verilmiştir. Yine fırlatılma testinde robotun MSM modelinin çıktılarının 5 saniyelik test grafikleri Şekil 10-18'de sunulmuştur. Grafiklerde MSMB modelinde ihmal edilebilir farklarla kontrolün sağlandığı ve robotun zıplamadığı süre boyunca istikrarlı bir şekilde dengede durduğu görülebilmektedir.



**Şekil 9.** MSM'in ürettiği animasyondan alınan, robot fırlatılma ve dengelenmesine kadar olan süreye ait ekran görüntüleri.

Robot düşüşe geçtiğinde  $x_1$  ve  $y_1$ 'in doğrusal konum ve hız bileşenleri sırasıyla

Şekil 10 ve

Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11'de  $y_1$  değerinin 1 saniyelik süre içinde 0,19 metrede sabitlendiği görülmektedir.

Şekil 12 ve 15'te  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  değerinin aynı süre içinde dengelendiği ayrıca  $\dot{\theta}_1$  ve  $\dot{\theta}_2$ 'nin 0 rad/s'de sabitlenmiştir.

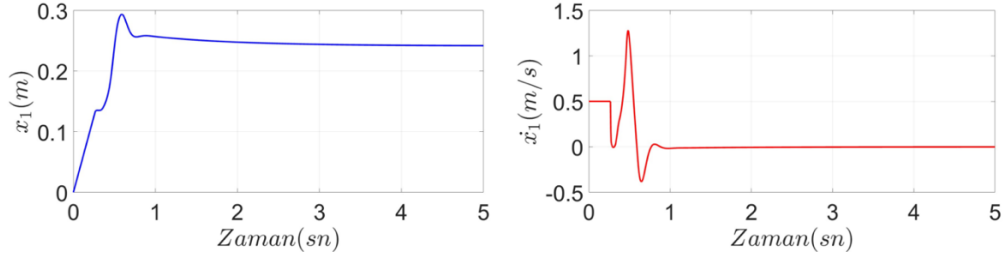
Şekil 14'te (solda), robot topuk ucunun yer ile teması başladığında  $L_4^x$  değerindeki farkın 3 saniye içinde yakınlığı ve sonsuzda kapandığı görülebilmektedir.

Şekil 14'te (sağda), robotun yere düşme etkisiyle aldığı darbeye bağlı olarak  $L_4^y$  değerindeki fark hemen kapanmakta ve  $L_4^{des}$  değerine yaklaşmaktadır. Burada dengelenme işlemine odaklanıldığından dikey bileşende referans etrafında oluşan yaklaşık 2 cm'lik fark uygun görülmüştür.

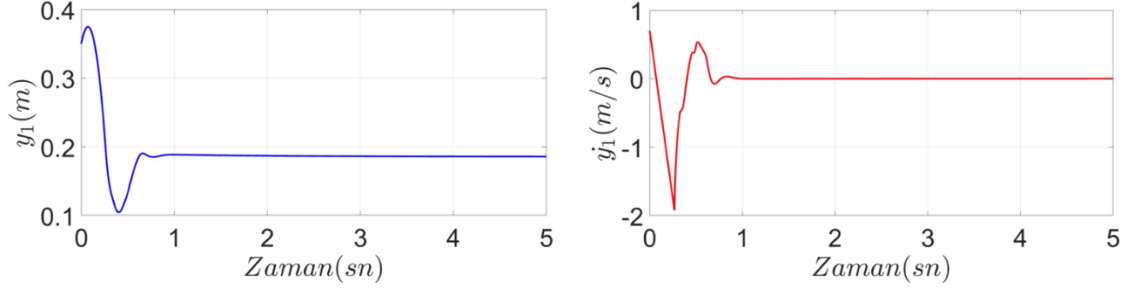
Şekil 15'te (sağda), robot gövdesinin istenen pozisyonda dengesini koruyabilmesi için reaksiyon tekerleğine uygulanan tork eylem sinyali görülmektedir.

Şekil 15'te görüldüğü gibi, darbeye rağmen  $\tau_2$  ve  $\tau_3$  kontrol torkları robotu istenen referansta dengelemeyi başarmıştır. Şekil 16'da  $\theta_4$ , 3 saniye süre içinde referans değere oldukça yaklaşmış ve istenen  $\pi/2$  radyan referans değerine sonsuzda sabitlendiğini göstermektedir. Ayrıca,

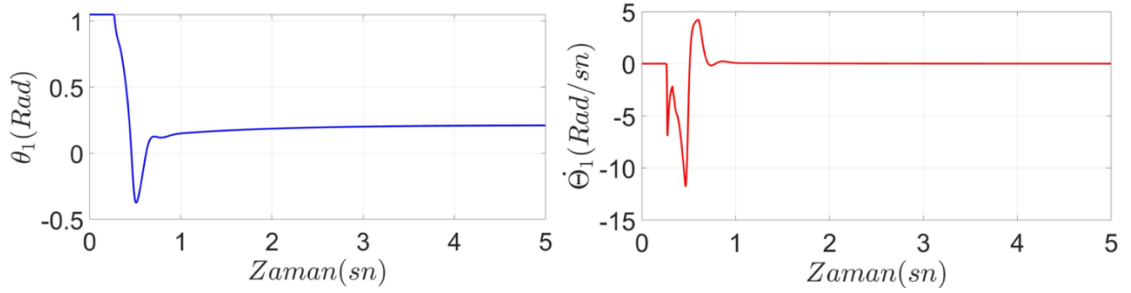
Şekil 17'de denge sağlandıktan sonra reaksiyon tekerinin açısal hızı doyum noktasından uzaklaşmış buna karşılık reaksiyon tekerine verilen  $\tau_3$  kontrol torku sıfırlanmıştır. Aynı eksenal hızlarda iken farklı yüksekliklerden fırlatılan robotun dengelenme performansına ilişkin simülasyon sonuçları Şekil 18'de sunulmuştur. Gövde merkezi maksimum yükseklik olan  $y_1 = 0,5$  metrede fırlatıldığında, robot dengesini koruyabilmiştir. Ancak bu yüksekliğin üzerine çıkıldığında, devrilme başlamıştır.



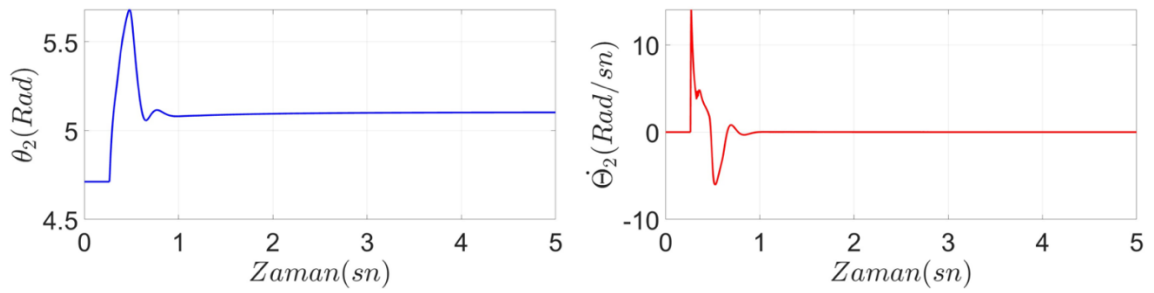
Şekil 10. Fırlatılma esnasında  $x_1$  konumu (solda) ve  $\dot{x}_1$  hızındaki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.



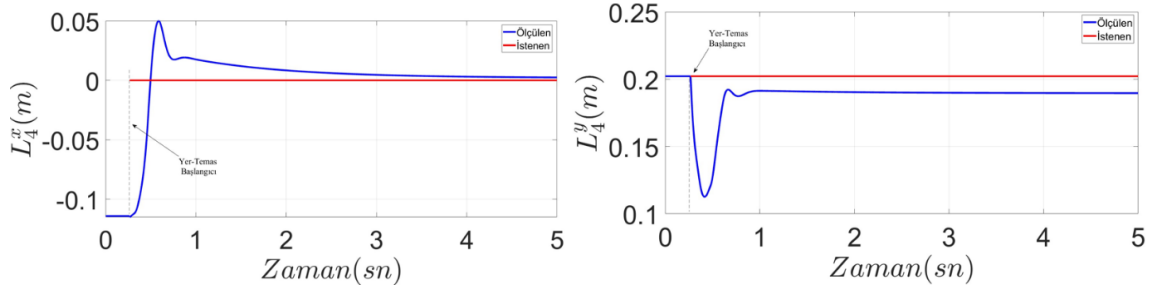
Şekil 11. Fırlatılma esnasında  $y_1$  konumu (solda) ve  $\dot{y}_1$  hızındaki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.



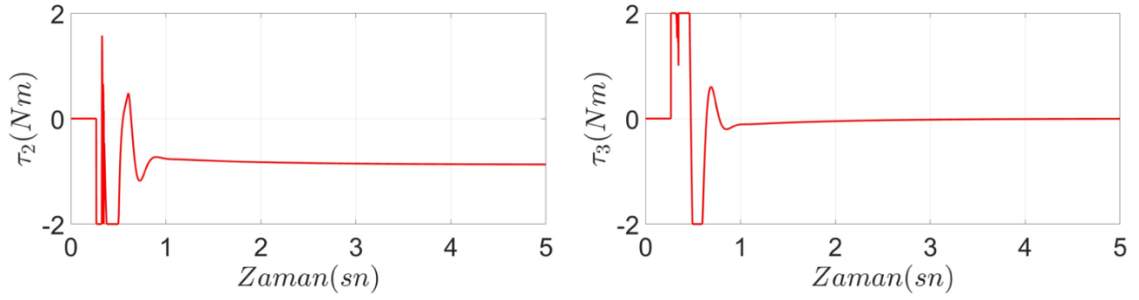
Şekil 12. Fırlatılma esnasında  $\theta_1$  açısai konumu (solda) ve  $\dot{\theta}_1$  açısai hızındaki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.



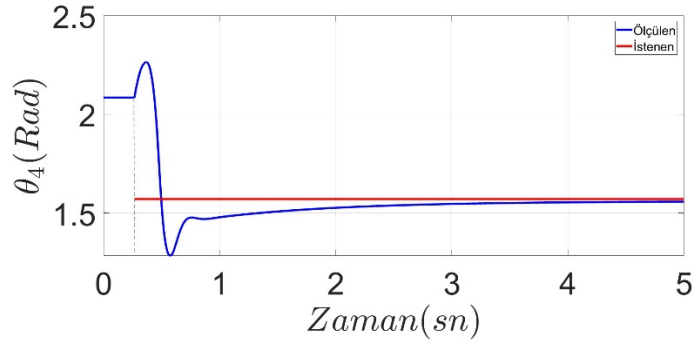
Şekil 13. Fırlatılma esnasında  $\theta_2$ 'in açısai konumu (solda) ve  $\dot{\theta}_2$  açısai hızındaki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.



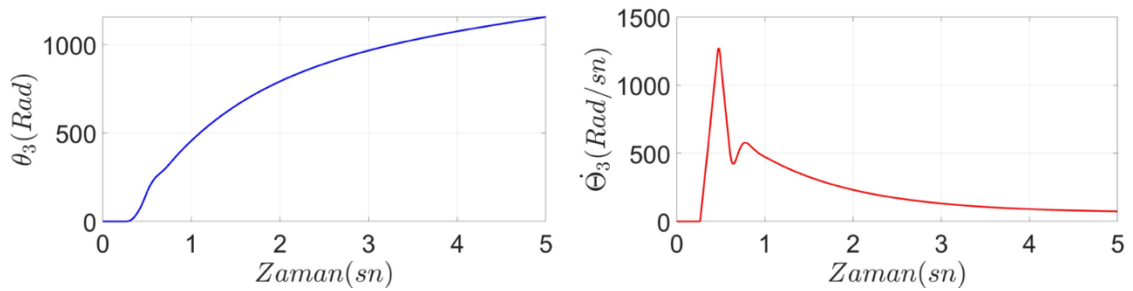
Şekil 14. Simülasyon neticesinde  $L_4^x$  (solda) ve  $L_4^y$ 'deki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.



Şekil 15. Simülasyon neticesinde  $\tau_2$  ve  $\tau_3$ 'teki 5 saniyelik değişim grafikleri.

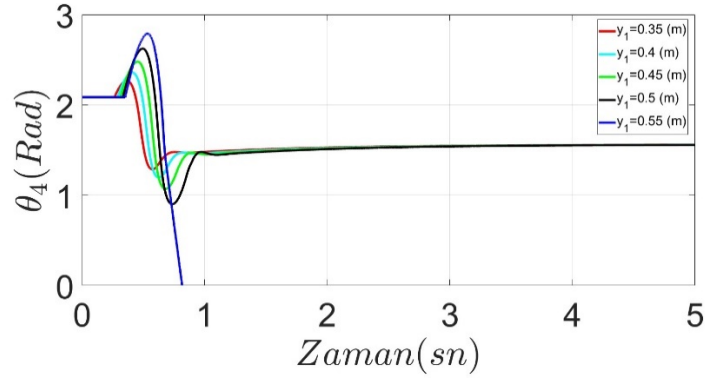


Şekil 16. Simülasyon neticesinde  $\theta_4$ 'teki 5 saniyelik değişim grafikleri.



Şekil 17. Fırlatılma esnasında  $\theta_3$  açısai konumu (solda) ve  $\dot{\theta}_3$  açısai hızındaki (sağda) 5 saniyelik değişim grafikleri.





Şekil 18. Farklı yüksekliklerden fırlatılan robotun denge durumlarını gösteren 5 saniyelik değişim grafiği.

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada zıplayan robot, noktasal kontak oluşturacak şekilde modellenmesine rağmen zıpladıktan sonra yerde bulunduğu sürece dengede kalmayı öğrenerek dengesini koruyabilmiştir. Grafikselsel sonuçlar robotun 5 saniye boyunca devrilmediğini ve dengelenmede bir kriter olan kontak noktası ve ağırlık merkezi çizgisine ait açı olan  $\theta_4$ 'ün de  $\pi/2$  radyan değerine 1 saniyelik süre içinde sabitlendiğini göstermektedir. Düzlemsel hareket, simülasyonda etkili bir şekilde kontrol edilmiş olsa da gerçek bir uygulamada dikkate alınması gereken çok sayıda parametre olacaktır. 3D uygulamada gelecek ek ağırlıkların kontrol edilebilirlik açısından maliyetleri olacaktır. Ek kütlelerin neden olduğu sorun, daha güçlü eyleyiciler kullanılarak çözülebilir ve devrilmeden istenen kurulum sağlanabilir. Bir diğer potansiyel çözüm olarak dengelenme görevi için eksik tahrikli gövde eksenlerini aktif olarak hareketlendirmek için fırçasız motorların ve pervanelerin kullanılması kontrolü kolaylaştırabilir. Bu çalışma için, Ana gövde eksenlerinde Reaksiyon tekerleri yerine fırçasız motorlar ve pervanelerin aktüatör olarak kullanılmasıyla iki eksenin sürülmesi, dengede kalma görevinin yerine getirilmesinde oldukça etkili olacaktır. Kısa sürede yüksek itme güçleri elde edilebileceğinden, istenen kontrol daha kolay sağlanabilecektir. Ayrıca, gövde eksenleri boyunca doğrusal hareketlere izin verilmesi, zıplanan yönde konum kontrolüne olanak sağlayacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Rui C, Kolmanovsky IV, McClamroch NH. Nonlinear attitude and shape control of spacecraft with articulated appendages and reaction wheels. IEEE Trans Automat Contr 2000; 45(8): 1455-1469.
- [2] Shengmin G, Hao C. A comparative design of satellite attitude control system with reaction wheel. In: Proceedings - First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, AHS 2006; pp. 359-362.
- [3] Yang Y. Spacecraft Attitude and Reaction Wheel Desaturation Combined Control Method. IEEE Trans Aerosp Electron Syst 2017; 53(1): 286-295.
- [4] Brown TL, Schmedeler JP. Reaction Wheel Actuation for Improving Planar Biped Walking Efficiency. IEEE Transactions on Robotics 2016; 32(5): 1290-1297.
- [5] Lee CY, Yang S, Bokser B, Manchester Z. Enhanced Balance for Legged Robots Using Reaction Wheels. In: 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2023; pp. 9980-9987.
- [6] Graduate BB, Assistant R, Manchester Z. Rex Hopper: Design And Control Of A Monopod Hopper With Reaction Wheels.
- [7] Zhang P, Wu Z, Dong H, Tan M, Yu J. Reaction-Wheel-Based Roll Stabilization for a Robotic Fish Using Neural Network Sliding Mode Control. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 2020; 25(4): 1904-1911.
- [8] Gajamohan M, Merz M, Thommen I, D'Andrea R. The Cubli: A cube that can jump up and balance. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2012; pp. 3722-3727.
- [9] Muehlebach M, Mohanarajah G, D'Andrea R. Nonlinear analysis and control of a reaction wheel-based 3D inverted pendulum. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2013; pp. 1283-1288.
- [10] Brown TL, Schmedeler JP. Reaction Wheel Actuation for Improving Planar Biped Walking Efficiency. IEEE Transactions on Robotics 2016; 32(5): 1290-1297.
- [11] Han SI, Lee JM. Balancing and velocity control of a unicycle robot based on the dynamic model. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015; 62(1): 405-413.
- [12] Trentin J, da Silva S, Ribeiro J, Schaub H. Inverted Pendulum Nonlinear Controllers Using Two Reaction Wheels: Design and Implementation. IEEE Access 2020; PP: 1.
- [13] Hülako H, Yakut O. Control of Three-Axis Manipulator Placed on Heavy-Duty Pentapod Robot. Simul Model Pract Theory 2021; 108: 102264.

- [14] Zhang S, Zhang H, Fu Y. Leg Locomotion Adaption for Quadruped Robots with Ground Compliance Estimation. *Appl Bionics Biomech* 2020; 2020: 8854411.
- [15] Belascuen G, Aguilar N. Design, Modeling and Control of a Reaction Wheel Balanced Inverted Pendulum. In: 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON); 2018; pp. 1-9.



## Alzheimer Hastalığının Teşhisinde Görüntü Dönüştürücü (Vision Transformer) Yaklaşımı: Yenilikçi Bir İnceleme

Mehmet Emre SERTKAYA<sup>1\*</sup>, Burhan ERGEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uzaktan Eğitim, Uygulama ve Araştırma Merkezi, Rektörlük, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> emre.sertkaya@samsun.edu.tr, <sup>2</sup> [bergen@firat.edu.tr](mailto:bergen@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 28/12/2023;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Nörodejeneratif bir hastalık olan Alzheimer hastalığı, Demans'ın en yaygın türüdür. Şu an için kesin bir tedavisi bulunmayan bu hastalığın ilerlemesini yavaşlatıcı tedavi yöntemleri uygulanmaktadır. Bu nedenle, hastalığın erken teşhisi ve diğer hastalıklarla karıştırılmaması kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI) tarafından toplanan üç boyutlu MR görüntüleri kullanılarak Görüntü Dönüştürücü yöntemleriyle Alzheimer hastalığının tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Alzheimer hastaları (AD), Hafif Bilişsel Bozukluk (Mild Cognitive Impairment - MCI) ve sağlıklı bireylerden (Cognitive Normal - CN) oluşan bu veri seti, %70'i eğitim, %10'u doğrulama ve %20'si test veri setleri olarak ayrılmıştır. Literatürdeki çeşitli derin öğrenme yöntemlerinin yanı sıra yeni bir yaklaşım olan Görüntü Dönüştürücü (Vision Transformer) kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Çalışma sonuçları, test görüntülerinde Görüntü Dönüştürücü'nün AD/MCI ikili sınıflandırmasında %79,8 başarı, MCI/CN ikili sınıflandırmasında %80,3 başarı ve AD/CN ikili sınıflandırmada %89,3 başarı elde ettiğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Alzheimer Hastalığı, Görüntü Dönüştürücü, Evrimsel Ağlar, ADNI veri seti.

### Vision Transformer Approach in the Diagnosis of Alzheimer's Disease: An Innovative Review

**Abstract:** Alzheimer's disease, a neurodegenerative disease, is the most common type of Dementia. Currently, there is no definitive cure for this disease and treatment methods are applied to slow down the progression of this disease. Therefore, early diagnosis of the disease and prevention of confusion with other diseases is of critical importance. In this study, it is aimed to detect Alzheimer's disease with Image Transform methods using three-dimensional MR images collected by the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI). This dataset, which consists of Alzheimer's patients (AD), Mild Cognitive Impairment (MCI) and healthy individuals (Cognitive Normal (CN)), is divided into 70% training, 10% validation and 20% test datasets. In addition to various deep learning methods in the literature, classification was performed using a new approach, Vision Transformer. The results of the study show that the Vision Transformer achieved 79.8% success in AD/MCI binary classification, 80.3% success in MCI/CN binary classification and 89.3% success in AD/CN binary classification.

**Key words:** Alzheimer's Disease, Vision Transformer, Convolutional Networks, ADNI dataset.

## 1. Giriş

Alzheimer Hastalığı (AH), Demansın en yaygın türüdür ve beyindeki nörodejeneratif süreçlerden kaynaklanan çeşitli sorunlara sebep olur [1]. Bu hastalık, günümüzdeki en tehlikeli ve ölümcül hastalıklardan biri olarak kabul edilmektedir [2]. AH'nin erken evrelerinde beyinde biriken amiloid lezyonları, nörodejenerasyona yol açan tau patolojisi ve hafif bilişsel değişiklikler gibi belirtiler görülür. Ancak, hastalarda amiloid lezyon ve nörodejenerasyon bulguları olmasına rağmen bilişsel değişiklikler her zaman gözlenmez, bu da erken teşhisi güçleştirir ve tedavi sürecini karmaşık hale getirir [3].

Dünya genelinde yaklaşık 50 milyon Alzheimer hastası bulunmaktadır ve bu rakamın her 5 yılda bir iki katına çıkması beklenmektedir [4]. AH belirtileri genellikle 60 yaşından sonra ortaya çıksa da genetik yatkınlığa bağlı olarak 30-50 yaşları arasında da görülebilir. Bu hastalık, beyinde yapısal ve işlevsel değişikliklere neden olur ve genellikle ileri aşamalarda teşhis edilir. Hasta önce Hafif Bilişsel Bozukluk (HBB) olarak tanı alır ve zamanla Alzheimer'a dönüşebilir, ancak her HBB Alzheimer'a ilerlemeyebilir. Bu değişiklikler, tıbbi görüntüleme teknikleri gibi yöntemlerle ölçülebilir [5, 6]. Bununla birlikte, AH'ye dönüşecek hafif bilişsel bozukluk, herhangi bir AH belirtisi ortaya çıkmadan 20 yıl veya daha uzun bir süre önce başlayabilir. Erken Hafif Bilişsel Bozukluk (EMCI), MCI ve Geç Hafif Bilişsel Bozukluk (LMCI) evreleri, durumun günlük aktiviteleri bozacak kadar ilerlediği zamanlardır. AH tedavi edilemezse de, erken evrelerinde yavaşlatılabilir.

Sonuç olarak, AD'nin erken teşhisi, hastaların yaşam kalitesini ve tedavi denemelerinin sonuçlarını iyileştirmek için son derece arzu edilen bir durumdur. Nörogörüntüleme teknolojilerindeki hızlı ilerleme nedeniyle

\* Sorumlu yazar: [emre.sertkaya@samsun.edu.tr](mailto:emre.sertkaya@samsun.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5060-1857, <sup>2</sup> 0000-0003-3244-2615

nörogörüntüleme tanısı, AH tanısı koymanın en sezgisel ve güvenilir yolu haline gelmiştir [7]. AH erken teşhisi, beyin anormal dejenerasyonunu yavaşlatmak ve daha iyi tedavi sağlamak için araştırılmaktadır. AH üzerine yapılmış çalışmalar, erken müdahale ve teşhisin tedavinin etkinliği için çok etkili olduğu gözlenmiştir. AH teşhisinde bilgisayar destekli tanı yöntemlerinin çok yararlı olduğu görülmüştür [8].

Nörogörüntüleme alanında yapay zeka, nörobilimcilerin tıbbi görüntüleme verilerini analiz etmek için geliştirilen ve hala gelişmekte olan bir teknoloji olarak kabul edilir. Son on yılda, derin öğrenme teknikleri nörobilimcilerin Alzheimer hastalığının çeşitli aşamalarını tahmin etmelerine yardımcı oldu. Bu teknoloji, bilim insanlarının güçlü hesaplama kaynaklarıyla medikal görüntüleme verilerini önceden işleyerek, karmaşık derin öğrenme modelleri oluşturmasına ve tıp doktorlarına erken evre Hafif Bilişsel Bozukluklu (MCI) beyinlerini, normal yaşlanma sürecindeki beyinlerden yüksek derecede ayırt etmelerine olanak tanıyacak sonuçları işlemelerine imkan sağlamaktadır. Bu ilerlemeler, Alzheimer hastalığının erken teşhisi ve tedavisi için umut vadeden yeni yaklaşımlar sunmaktadır [9-11]. Literatürde çalışmalar incelendiğinde;

Ilias, L. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bu veri setini kullanarak tek görevli ve çok görevli derin öğrenme modelleri kullanarak Alzheimer hastalığının teşhisi için model önerdiler. Yaptıkları çalışmada transformator tabanlı BERT modelini kullanarak %87,5 doğruluğa ulaştılar. Çok görevli tanımladıkları yapıda ise ana görev Alzheimer hastalığının tespiti iken yan görev olarak bu hastalığın safhasını tespit etmede %86,25 doğruluk sergilediği görülmüştür [12].

Jain, V. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise Generative Adversarial Networks (GAN) mimarileri kullanarak veri artırımı yaparak dengesiz veri setini düzeltmeye amaçlamıştır. Sınıflardaki eşit miktardaki görüntüleri derin öğrenme modellerine verildiğinde VGG16 ve VGG19 derin öğrenme modellerinin %84 - %87 arasında başarımlar gösterdiği gözlenmiştir [13]. Başka bir çalışmada ise bu çalışma da kullanılan ADNI veri setini kullanarak verileri kesit kesit almak yerine 3 boyutlu alan Zhang, X. ve arkadaşları Attention tabanlı derin öğrenme modeli önermişlerdir. Başarımları artırmak ve Attention mekanizmasının odak noktasını belirlemek adına veri seti ilk önce Grad-CAM(Gradyan Tabanlı Yerelleştirme Sınıfı Aktivasyon Haritalaması) ile ön işleme sokmuşlardır. Çalışma sonuçları ResAttNET modelinin AD-CN ikili sınıfını %91 ve AD-MCI %82 doğruluk sergilediği gözlenmiştir [14].

Derin öğrenme modellerindeki aktivasyon fonksiyonlarını geliştirerek başarımları artırmaya çalışan Oktavian, M. ve arkadaşları AH tespitinde önerdikleri yöntemde mesh aktivasyon fonksiyonu kullanarak AH tespitinde %88,3 doğruluk sergileyecek modeller önermişlerdir [15]. Ma, H. ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada AH erken teşhisinde Deep Q-Network (DQN) modeli önerdiler. Pre-trained (başlangıç ağırlıklı) bu model kullanarak yapmış oldukları çalışmada DQN sınıflandırıcı AD ve CN sınıflandırmak için kullanılmıştır. Bir permütasyon testi gerçekleştirilmiştir. DQN transfer öğrenimi %86,66 sınıflandırma doğruluğu göstermiştir [16].

Mujahid, M. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada EfficientNet-B2 ve VGG-16'dan oluşan bir topluluk yapılı birleşik bir model önerdiler. Bu iki modelden ayrı ayrı son katmanlarından alınan özellikler birleştirilerek çeşitli katmanlar arayıcılığı ile özellikleri çıkarılarak AH safhaları bulmayı amaçlamışlardır. Çalışma %95,89 doğruluk başarımlarını göstermiştir [17].

Bu çalışmada 3 boyutlu MR görüntülerin elde edilen Alzheimer ve MCI görüntüleri kullanılarak Bu çalışmanın amaçları şunları içerir:

- 3 boyutlu medikal görüntülerin kullanımıyla daha kesin sonuçlar elde etmek,
- Sınırlı veri miktarına sahip görüntülerde performansı artırmak,
- Vision Transformer gibi yeni bir yöntemin Alzheimer hastalığının tespitindeki başarımlarını araştırmak,
- Görüntü dönüştürücü tekniklerinin performansını değerlendirmek.

Bu hedefler, derin öğrenme ve özellikle Vision Transformer gibi yenilikçi yöntemlerin Alzheimer hastalığının teşhisi üzerindeki etkisini ve potansiyelini anlamayı amaçlamaktadır. Bu yöntemlerin, az veriyle çalışma yeteneği ve 3 boyutlu medikal görüntülerde daha hassas sonuçlar elde etme olasılığı, Alzheimer teşhisi ve erken belirtilerinin tespiti konusunda yeni bir pencere açabilir.

Bu makalenin devamında, ikinci bölüm olan “Materyal ve Yöntem” kısmında kullanılan veri seti ve modeller detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Veri setinin yapısı, toplama süreci ve kullanılan analitik teknikler bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Önerilen metodoloji ve kullanılan algoritmaların yanı sıra görüntü dönüştürücü (Vision Transformer) yönteminin nasıl entegre edildiği de bu kısımda vurgulanmıştır. Üçüncü bölüm olan “Bulgular ve Tartışma” kısmı, elde edilen sonuçların derinlemesine incelendiği ve analiz edildiği bir kısımdır. Bu bölümde, görüntü dönüştürücü yönteminin performansı, sınıflandırma sonuçları ve veri setindeki farklı sınıflar arasındaki ilişkiler detaylı olarak sunulmuştur. Bulguların kapsamlı bir şekilde tartışılmasıyla, kullanılan metodolojinin avantajları ve sınırlamaları üzerinde odaklanılmıştır. Son bölüm olan “Sonuç” kısmında, elde edilen bulguların özeti sunulmuş ve bu çalışmanın önemi vurgulanmıştır. Çalışmanın katkıları, bulguların klinik ve araştırma alanlarındaki potansiyel etkileri ve önerilen metodolojinin gelecekteki kullanımı bu bölümde öne çıkarılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1 Veri Seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI) tarafından toplanan 3 boyutlu MR görüntülerinden oluşmaktadır [18]. ADNI-1, 2004 yılında başlamış ve orijinal olarak 2009 yılında planlanan beş yıllık bir süre boyunca devam etmiştir. Ancak daha sonra 2010 yılında beş yıl uzatılmış ve toplamda on yıllık bir süre boyunca devam etmiştir. Dolayısıyla, ADNI-1 veri toplama süreci, 2004 ile 2014 yılları arasında toplam on yıl sürmüştür. Bu süre boyunca, katılımcıların farklı aşamalarda verileri düzenli aralıklarla toplanmış ve kaydedilmiştir. ADNI-1 veri seti kullanıldığında, normal yaşlanma sürecinden başlayarak hafif kognitif bozukluk ve Alzheimer hastalığına kadar geniş bir yelpazede katılımcıları içermektedir. Bu, hastalığın farklı aşamalarındaki değişikliklerin izlenmesine ve anlaşılmasına olanak tanır. ADNI-1, geniş bir katılımcı grubunu içerir ve bu da verilerin çeşitliliğini artırır. Bu, Alzheimer hastalığının farklı demografik gruplardaki etkilerini anlamak için önemlidir. Bu veri setine ait demografik bilgiler Tablo 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Veri setine ait demografik bilgiler.

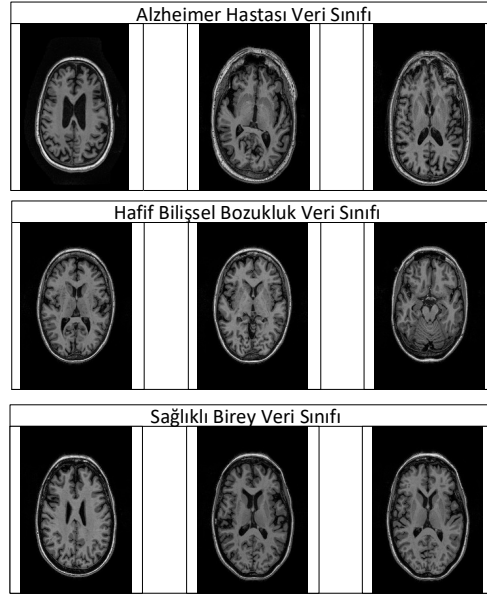
Sınıf Adı	Örnek Sayısı	Cinsiyet		Yaş		Mini Mental Sağlık Değeri-MMSE	
		Erkek	Kadın	Ortalama	Std.	Ortalama	Std.
Alzheimer	192	101	91	75,3	7,5	23,3	2,1
Hafif Bilişsel Bozukluk(MCI)	396	255	141	74,7	7,4	27,0	1,8
Normal	229	120	109	75,8	5,0	29,1	1,0

Tablo 1 incelendiğinde, 817 hastadan oluşan ve çeşitli aralıklarla kontrollere gelmeleri sonucu toplanan medikal verilerden oluştuğu görülmektedir. Bu veri seti, özellikle Alzheimer hastalığının erken dönemlerinde tanı ve ilerlemenin izlenmesi için uygun bir veri kaynağı olarak düşünülmektedir. Veri seti 3 adet sınıftan oluşmakta olup bunlar; Alzheimer hastalığı(Alzheimer Diagnosis - AD) sınıfı, Hafif Bilişsel Bozukluk(Mild Cognitive Impairment - MCI) sınıfı ve Sağlıklı(Cognitive Normal - CN) bireylerden oluşmaktadır. Bunlara ait görüntüler Şekil 1'de gösterilmektedir [18-20]. Bu görüntüler nifti uzantılı 3 boyutlu görüntülerden oluşmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, veri seti aksenel, sagittal ve koronal bölümlerin kesitleri alınarak ya da 3 boyutlu olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir [21, 22]. Genel olarak 256x256x166 boyutlarında olan bu MR görüntüleri, aksenel boyutta rasgele 70 ile 130 kesitleri arasından seçilmiştir. Çalışmanın odak noktası açısından biz en çok kullanılan aksenel görüntüler ait birkaç kesiti alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Veri seti görüntü miktarları ve dağılımları.

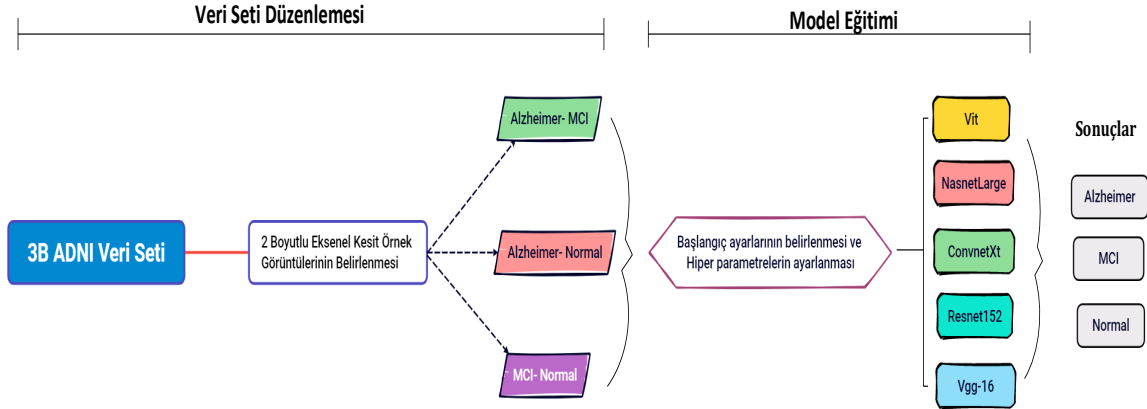
Sınıf Adı	Eğitim Görüntü Sayısı (%70)	Doğrulama Görüntü Sayısı (%10)	Test Görüntü Sayısı (%20)	Görüntü Sayısı
Alzheimer	786	112	226	1124
Hafif Bilişsel Bozukluk	1812	259	519	2590
Normal	1007	144	289	1440

Görüntüler modele verilmeden önce 3 gruba ayrıldı: eğitim, doğrulama ve test. Modeller eğitilirken her iterasyonun sonunda doğrulama görüntüleri kullanıldı. Son iterasyonda ise test görüntüleri verilerek başarımlar ölçüldü. Veri dağılım oranları %70 eğitimi, %10 doğrulama ve %20 test olarak ayarlandı. Bu dağılımlar ve görüntü miktarları ve dağılımı Tablo 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Veri seti örnek görüntüleri.

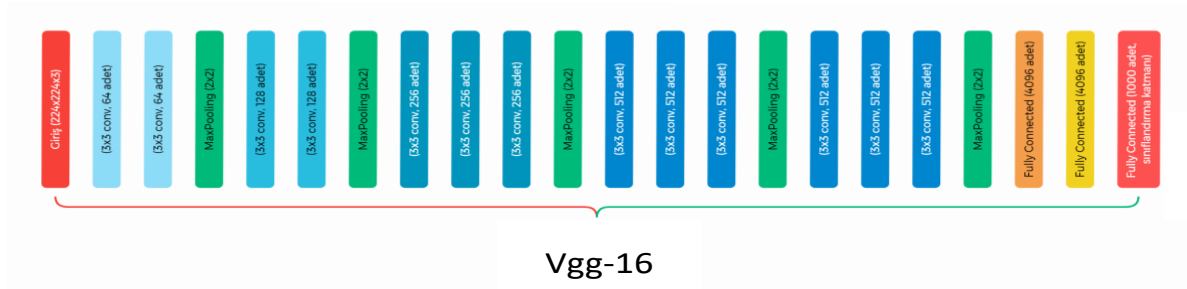
3 boyutlu MR görüntülerinden elde ettiğimiz bu görüntüleri 224x224 boyutlarında olmak üzere VGG-16, NasnetLarge, Resnet-152, ConvnetXt ve Vision Transformer modellerin hastalıkları öğrenmesi için verdik. Çalışmada diğer derin öğrenme yöntemleri de kullanıldı Aşırı öğrenme durumunda geçmeleri ve test değerlerini çok düşük olması nedeniyle bu yöntemler çalışmaya eklenmemiştir. Şekil 2’de çalışmanın iş akışı gösterilmektedir. Sınıf bazlı başarımları kıyaslamak adına ikili sınıflandırma şeklinde veri setini modellere verdik.



Şekil 2. Çalışmanın iş akış süreci.

## 2.2 Vgg-16

Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) olan VGG16, Visual Geometry Group (VGG) tarafından Oxford Üniversitesi’nde geliştirilmiştir. Adından da anlaşılacağı üzere 16 sıralı katmandan oluşan bir yapıya sahiptir. ImageNet veri tabanı üzerinde ön eğitilmiş bu model, veri setindeki örnek sayısı az olmasına rağmen iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Modelin iç mimarisi Şekil 3’te gösterilmekte olup 5 adet havuzlama katmanı, 3 adet tam bağlı katman olmak üzere 16 evrişimsel katmandan oluşmaktadır [23, 24].



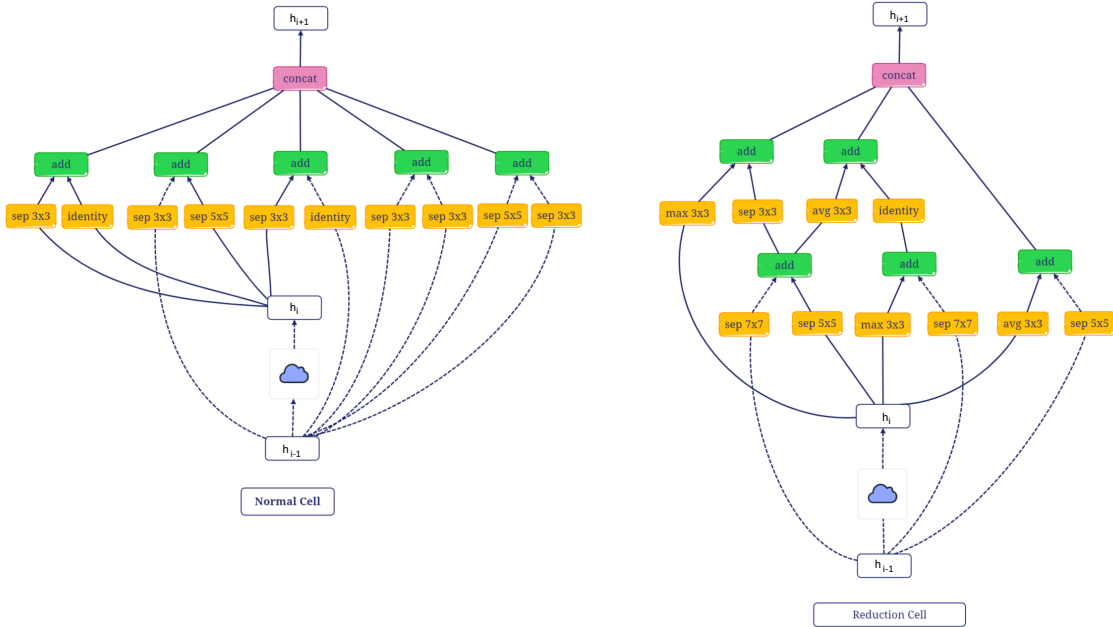
Şekil 3. Vgg-16 Mimarisi.

### 2.3 NASNetlarge

Nöral Mimari Arama (Neural Architecture Search - NAS) çerçevesinden esinlenen NASNetLarge takviyeli öğrenme arama yöntemlerinden biridir. Model Zoph, B ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [25]. Bu model, ImageNet veri görüntü kümesinde 1 milyondan fazla görüntü ile eğitilmiştir. NASNetLarge, insan eliyle tasarlanmayan tamamıyla otomatik üretilen bir mimari arama sürecinde oluşturulmuştur. NAS, bir arama uzayında dolaşarak ve optimize edici algoritmalar kullanarak en iyi mimari yapıyı bulmaya çalışır. Evrimsel katmandaki performansı artırmak için hücre yapısı oluşturmuştur. Bu hücre yapısının ilk katmanı tipik Evrimsel katman iken sonraki katmanı azaltma hücresidir [26]. Giriş görüntülerinin özellik vektörleri 4032 eleman olarak tanımlanmıştır ve NASNetLarge için varsayılan giriş görüntü boyutu 331x331'dir [27].

Şekil 4'te NASNetLarge hücre yapıları gösterilmektedir. Normal bir hücre birden fazla evrişim ve aktivasyon katmanlarının birbirleriyle bağlantıları ve geçişleri bulunur. Bu hücre, modelin genel yapısını oluşturan önemli bir bileşendir.

İndirgenmiş hücre ise, normal hücreye benzer bir yapıya sahiptir ancak genellikle daha küçültülmüş bir yapıdadır. Bu hücre, genellikle daha az sayıda parametreyle ve hesaplama maliyeti daha düşük bir yapıyla tasarlanır. İndirgenmiş hücre, modelin boyutunu azaltmak ve daha hafif bir model elde etmek için kullanılır.

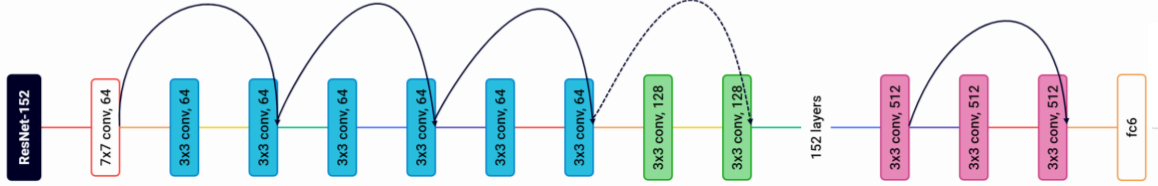


Şekil 4. NASNetLarge hücre yapısı.



## 2.4 ResNet-152

ResNet, Kaiming He ve arkadaşları tarafından 2016 yılında artık birimlerin kullanılmaya başlamasıyla ortaya çıkan Artık Sinir Ağı (Residual Neural Network) evrimsel sinir ağı modelidir. Düz bir sinir ağı derinliğinin artması sonucu katmanlarda kaybolan gradyan kaybına ve ağ bozulması sorunlarını çözmek için oluşturulmuştur. ResNet, özellikle görüntü tanımda yepyeni bir fikir ortaya atmıştır [28, 29]. ResNet, girdiyi değiştirmeden bir katmandan diğerine sığdırmak için atlama bağlantılarını (kısayol bağlantıları olarak da bilinir) kullanır. Bu sayede hem modelin ezber yapmasını engeller hem de ara katmanlardaki kaybolan özellikleri daha sonraki katmanlara taşır [30]. Bu yapı 152 katmandan oluşmaktadır. Şekil 5'te ResNet-152 mimari yapısı gösterilmektedir.

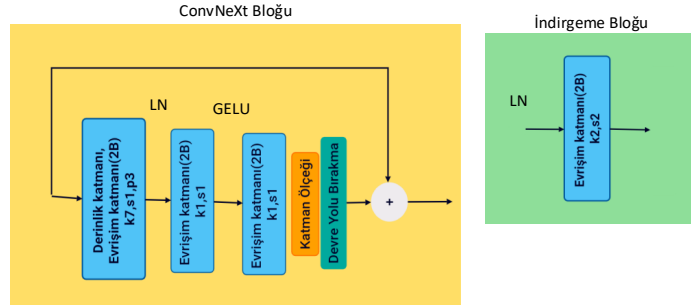


Şekil 5. ResNet Mimarisi.

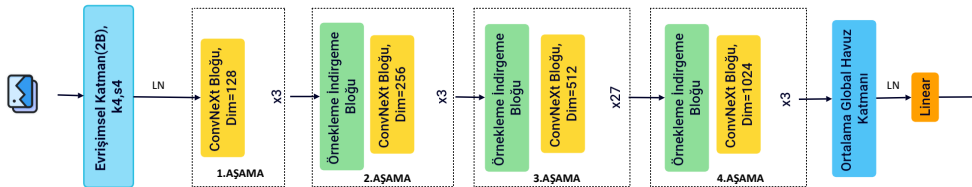
## 2.5 ConvNeXt

Bu çalışmada kullanılan diğer bir yöntem olan ConvNeXt, ilk olarak 1980 yılında tanıtılan ConvNet, geri yayılım olarak önerilmiştir. Zamanla optimizasyon, doğruluk ve verimlilik açısından sayısız gelişme kaydetmiştir. Daha sonra, özellikle ImageNet görüntü setinde gösterdiği başarıyla tam anlamıyla keşfedilmiştir [31].

ConvNeXt ağı, geleneksel ağ modellerinden farklı olarak genel yapı, derin evrişim, ters şişirme, büyük evrişim çekirdeği, GELU aktivasyon fonksiyonu ve LN katmanı gibi çeşitli alanlarda geliştirmeler yapmıştır. Genel yapı açısından, ConvNext ağının Kök katmanı, Swin Transformer'a benzer şekilde aynı boyuttaki bir evrişim çekirdeği ve dört adımlı bir evrişim işlemi kullanır. Evrişim konusunda, ConvNeXt ağı giriş ve çıkış kanal miktarlarını ayırarak derin evrişim tasarımının parametre boyutunu azaltır, bu da geleneksel evrişimden çok daha küçüktür [32, 33]. Şekil 6'da ConvNeXt blok yapıları gösterilmiştir. Bu blok dizinleri sıralı bir şekilde modelde bulunarak özellikleri çıkarmaktadır. Şekil 6'da gösterilen blokları kullanan ConvNeXt mimarisi Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 6. ConvNeXt Blok Yapıları.

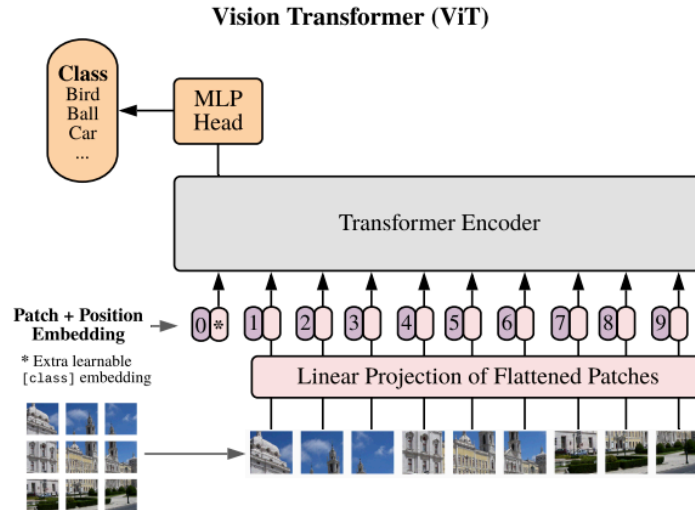


Şekil 7. ConvNeXt Mimarisi.

## 2.6 Vision Transformer

Dönüştürücülerin makine çevirilerindeki başarılarından esinlenerek, sadece dönüştürücü katmanlar kullanan evrişim katmanı olmadan özellikler çıkaran bir model olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle Vision Transformer'ler (ViT) görüntü sınıflandırması için CNN'lerle eşleşen veya hatta onları aşan dönüştürücü tabanlı yöntemin ilk örneğidir [34, 35]. ViT birçok çeşidi yakın zamanda önerilmiştir; bunlar arasında veri verimli eğitim için damıtma [36], yapay sinir ağlarındaki gibi piramit yapı ya da tümünden kendine dikkat yerine soyut bir temsil öğrenerek verimliliği artırmak için öz-dikkat(self-attention) bulunmaktadır [37]. ViT model yapısı Şekil 8'de gösterilmektedir [35]. ViT'nin ESA modellerine göre başlıca avantajları şu şekilde ifade edilebilir: Dikkat Mekanizması, Ölçeklenebilirlik, Transfer Öğrenme Yeteneği ve Daha Az Veri Gereksinimidir. Dikkat Mekanizması, ViT'in dikkat mekanizması kullanarak görüntü işleme sürecinde pikseller arasındaki ilişkileri modelleyebilir. Bu, piksel bazında değil, pikseller arası ilişkilere dayalı olarak özellik çıkarmaya olanak tanır ve daha uzak ilişkileri yakalayabilir. Ölçeklenebilirlik, geleneksel ESA yapılarına göre daha ölçeklenebilir bir yapı sunar. Daha büyük görüntü boyutlarına ve daha fazla parametreye sahip olabilecek şekilde eğitilebilir. Bu, daha karmaşık görevlerde daha iyi performans elde etme potansiyelini artırır. Transfer Öğrenme Yeteneği, büyük ölçekli dil modellerinde olduğu gibi transfer öğrenme yeteneğine sahiptir. Önceden eğitilmiş bir ViT modeli, görsel görevler için başlangıç noktası olarak kullanılabilir ve daha az etiketlenmiş veriyle eğitim için kullanılabilir. Daha Az Veri Gereksinimi, ViT'nin daha az veriyle eğitilmesine olanak tanır. Geleneksel ESA yapılarına göre daha az veriyle iyi sonuçlar elde etme eğilimindedir. ViT, geleneksel evrişimsel sinir ağlarındaki(ESA) yapı yerine tamamen dikkat mekanizmasına dayalı(attention) bir mimari kullanır. ViT adımları şöyle açıklanabilir;

- Resim bloğu, giriş görüntülerini küçük yama dediğimiz parçalara böler. Bu parçalar gömme(Embedding) işlemiyle vektörel bir yapıya dönüştürür. ESA'lardaki gibi görüntüyü tüm olarak modele vermez.
- Patch adımı, görüntü yamaları oluşturulur ve bu yamalar gömme işlemine tabi tutulur. Her bir yamanın gömülü gösterimi, daha sonra ViT'nin girişine verilecek olan yığını oluşturur.
- Pozisyon Gömme, her yamaya bu adımda konumu veya pozisyon bilgileri verilir. Bu sayede ViT'nin dikkat mekanizması her yamanın çıkaracağı özellikler ile birlikte konum bilgisine de dikkate alır.
- Transformer Encoder, görüntüyü işlemek için birden çok odaklı transformer encoder katmanı kullanılır. Bu katmanlar, dikkat mekanizmalarını ve çoklu-kafa (multi-head) dikkat başlıklarını içerir. Giriş yığını, bu Transformer encoder katmanlarından geçer.
- Son olarak ESA'larda kullanılan sınıflandırıcı katmanına iletilir. Bu katman sınıflandırma tahmini yapar [38].



Şekil 8. ViT model yapısı [35].

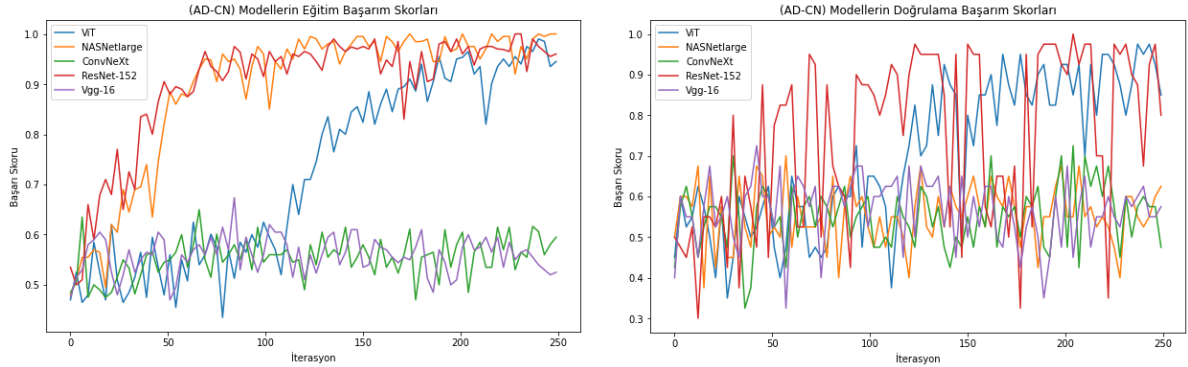
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, 3 boyutlu ADNI veri seti görüntülerine ait ekstenel kesitler alınarak yapay zeka modellerine verdik. 250 iterasyon, 8 mini-batch ve 220x220 boyutunda hiperparametre başlangıç ayarı olarak tanımlanmıştır. Veri dağılım oranları %70 eğitimi, %10 doğrulama ve %20 test olarak ayarlandı. Çalışma bulguları Alzheimer-Normal, Alzheimer-MCI ve MCI-Normal olmak üzere 3 adet ikili sınıfa ait sonuçlar alınmıştır. Az görüntüde ve 3 boyutlu MR kesitlerinden alınan ham görüntülerin başarımını artırmaktır. Tablo 3'te bu sınıflara ait Eğitim ve Doğrulama başarım sonuçları gösterilmektedir. Tablo 3 incelendiğinde NasNetLarge modeli eğitim en iyi sonuçları vermesine rağmen modellere verilen doğrulama görüntüleri verildiğinde, AD-CN ve AD-MCI ikili sınıfları incelendiğinde ViT modeli iyi sonuç verirken MCI-CN sınıfında ResNet-152 en iyi sonucu vermiştir.

**Tablo 3.** Modellere ait Eğitim ve Doğrulama Başarımları.

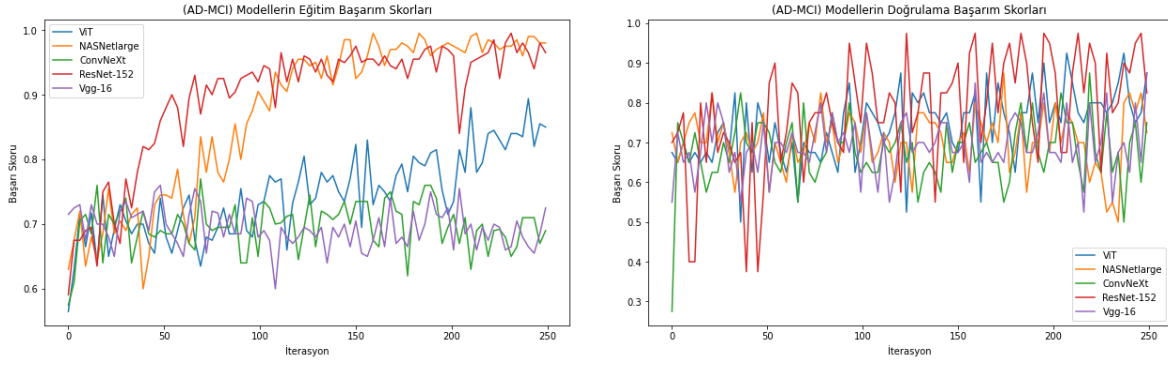
Model Adı	Eğitim			Doğrulama		
	AD-CN	AD-MCI	MCI-CN	AD-CN	AD-MCI	MCI-CN
<b>ViT</b>	%94,5	%85	%72	<b>%85</b>	<b>%87,5</b>	%82,5
<b>NasNetLarge</b>	<b>%100</b>	<b>%98</b>	<b>%98</b>	%62,5	%72,5	%70
<b>ConvNeXt</b>	%59,5	%69	%63,5	%47,5	%75	%60
<b>ResNet-152</b>	%95,9	%96,49	%93,99	%80	%82,49	<b>%92,5</b>
<b>Vgg-16</b>	%52,49	%72,5	%67,5	%57,49	%87,5	%62,5

Şekil 9'da AD-CN sınıflarına ait modellerin eğitim ve doğrulama grafikleri verilmiştir. İki grafik incelendiğinde, NasNetLarge eğitimde %100 sonuç vermiş olsa da doğrulama da %62,5 başarımı düşük gözlemlenmiştir. Bu modelin ezber yaptığı ya da aşırı öğrenme yaptığı göstergesidir. Doğrulama grafiği incelendiğinde, ViT ve Resnet-152 modelleri daha iyi sonuçlar eğitime bağlı olarak iyi sonuçlar sergilemiştir. Doğrulama en iyi sonucu ViT modeli %85 vermiştir.



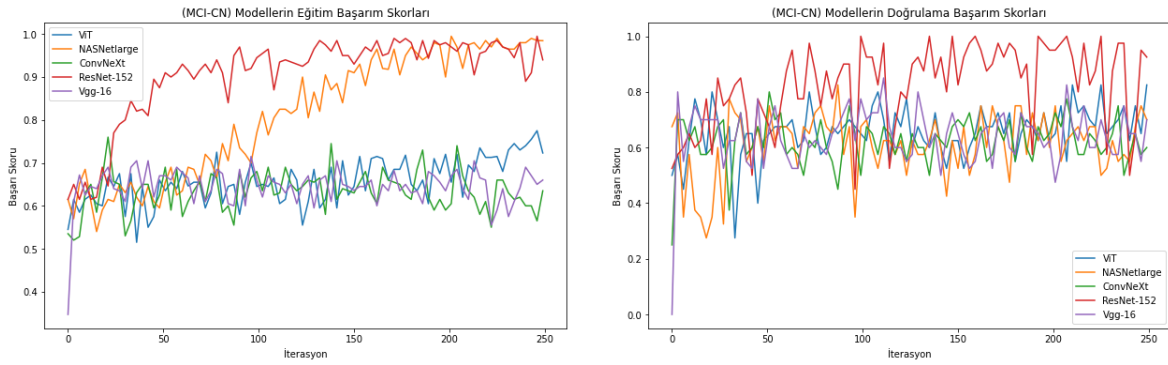
**Şekil 9.** (AD-CN) Eğitim ve Doğrulama Başarım Grafikleri.

Şekil 10'da AD-MCI sınıflarına ait modellerin eğitim ve doğrulama grafikleri verilmiştir. İki grafik incelendiğinde, Şekil 9'daki gibi NasNetLarge %98 sonuç sergilemiş olsa da eğitimde, %72,5 doğrulama ile aşırı dalgalanma yaptığı gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar, öğrenememe durumundan göstergesidir. Doğrulama en iyi sonucu ViT modeli %87,5 vermiştir.



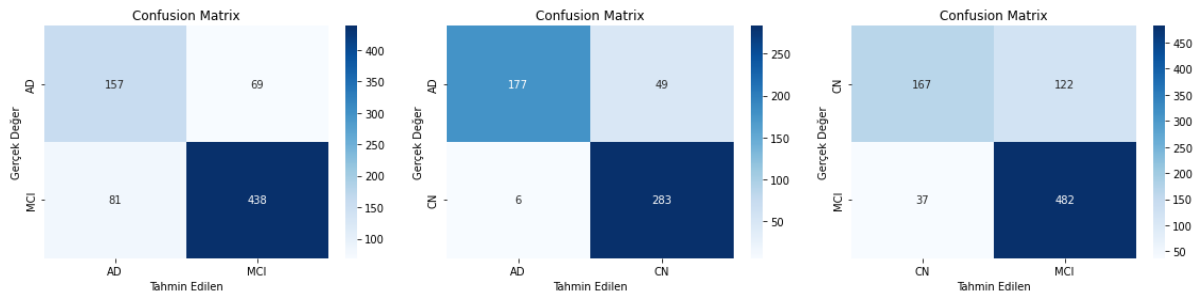
Şekil 10. (AD-MCI) Eğitim ve Doğrulama Başarım Grafikleri.

Şekil 11’de MCI-CN sınıflarına ait modellerin Eğitim ve Doğrulama grafikleri verilmiştir. İki grafik incelendiğinde, NasNetLarge %98 sonuç sergilemiş olsa da eğitimde verirken ResNet-152 modeli doğrulamada %92,5 başarımlar göstermiştir. Resnet-152’den sonra en iyi başarımları doğrulamada ViT modeli %82,5 vermiştir.



Şekil 11. (MCI-CN) Eğitim ve Doğrulama Başarım Grafikleri.

Aşağıda Şekil 12’de ViT modeline ait test sonuçlarına ait karmaşık matrisi gösterilmiştir. Bu karmaşık matrisleri sırasıyla; AD-MCI, AD-CN ve CN-MCI sınıflarına ait sonuçlardır. Diğer modellere ait karmaşık matrisi ölçütleri Tablo 3’te gösterilmektedir. MCI sınıfına ait sınıflandırmalarda modellerin tespitinin zor olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 12. ViT modeline ait karmaşık matrisi sonuçları (AD-MCI, AD-CN ve CN-MCI).

Tablo 4 incelendiğinde her sınıfa ait test başarımlarında ViT modeli diğer modellere göre daha iyi sonuç sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle Alzheimer sınıfına ait bazı tespitlerde daha iyi sonuçlar sergilemiştir. MCI sınıfının ait başarımlar incelendiğinde AD-MCI genel başarımlarında ViT iyi olmasına rağmen MCI başarımların değerleri Resnet-152 daha iyi değerler üretmiştir. Bu çalışmada, önerilen modelin başarımının değerlendirilmesi için Hassasiyet (Precision) ve F1 Skor performans kriterleri kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Modellere ait Test Başarım Ölçütleri.

Model	Sınıf	AD-CN			AD-MCI			MCI-CN		
		Doğruluk	Hassasiyet	F1 Skor	Doğruluk	Hassasiyet	F1 Skor	Doğruluk	Hassasiyet	F1 Skor
ViT	Sınıf 1	<b>89,32</b>	78	87	<b>79,87</b>	69	68	<b>80,32</b>	58	68
	Sınıf 2	<b>89,32</b>	98	91	<b>79,87</b>	84	85	<b>80,32</b>	93	86
NasNetLarge	Sınıf 1	56,11	0	0	69,66	0	0	64,23	0	0
	Sınıf 2	56,11	100	72	69,66	100	72	64,23	100	78
ConvNeXt	Sınıf 1	56,11	0	0	69,66	0	0	64,23	0	0
	Sınıf 2	56,11	100	72	69,66	100	72	64,23	100	78
ResNet-152	Sınıf 1	87,21	99	87	74,22	24	30	78,46	58	66
	Sınıf 2	87,21	78	87	74,22	89	84	78,46	90	84
Vgg-16	Sınıf 1	56,11	0	0	69,66	0	0	64,23	0	0
	Sınıf 2	56,11	100	72	69,66	100	72	64,23	100	78

Bu çalışmada kullanılan derin öğrenme modellerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, özellikle yüksek başarı sergileyen ViT modelinde herhangi bir aşırı uyum veya yetersiz uyum problemi ile karşılaşmadığı gözlemlenmiştir. ViT'ten sonra, özellikle eğitimde en iyi sonuçları NasNetLarge vermiş olsa da aşırı uyumda kaynaklı doğrulama ve teste iyi sonuçlar sergilememiştir. Bununla birlikte, özellikle MCI barındıran verilerde ResNet-152 mimarisi ayırt etmede daha iyi sonuçlar sergilemiştir. Ayrıca elde edilen eğitim doğruluklarının kanıtlanabilirliği adına, en başarılı test sonuçları sağlayan modellerin karmaşıklık matrislerine çalışmada yer verilmiştir.

#### 4. Sonuç

Alzheimer gibi nörolojik hastalıklar, insan yaşamını derinden etkileyen ve tedavi edilmesi henüz mümkün olmayan durumlardır. Bu hastalıkların etkisiyle beyinde meydana gelen değişiklikler, günlük yaşamı oldukça zorlaştırırken, bu durum hastaların yaşam kalitesini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Dolayısıyla, bu tür hastalıkların erken teşhis edilmesi ve farkındalığın artırılması, hastalığın ilerlemesini kontrol etmek ve daha iyi bir yaşam kalitesi sağlamak için son derece önemlidir. Yapmış olduğumuz çalışmada az veri ve 3 boyutlu ham görüntü kesitleri kullanılarak özellikle Alzheimer hastalığının teşhisi için bilgisayar destekli modeller önerdik. Çalışma sonuçları, özellikle yeni bir yaklaşım olan evrişim katmanları kullanmayan ViT modelinde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ADNI veri seti kullanılmıştır. ADNI veri setinin kullanımı ve doğru kesit seçimi gibi parametreler, gelecek çalışmaların odak noktası olabilir ve bu faktörlerin etkisi üzerine yapılan araştırmaların, daha kapsamlı ve verimli sonuçlara ulaşmamıza katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### Kaynaklar

- [1] Lopez JAS, Gonzalez HM, Leger GC. Alzheimer's disease. *Handb Clin Neurol* 2019; 167: 231-255.
- [2] Scheltens P, De Strooper B, Kivipelto M, Holstege H, Chetelat G, Teunissen CE, Cummings J, van der Flier WM. Alzheimer's disease. *The Lancet* 2021; 397(10284): 1577-1590.
- [3] Karikari TK, Pascoal TA, Ashton NJ, Janelidze S, Benedet AL, Rodriguez JL, Chamoun M, Savard M, Kang MS, Theriault J, Schöll M, Masson C, Soucy JP, Höglund K, Brinkmalm G, Mattsson-Carlgen N, Palmqvist S, Gauthier S, Stomrud E, Rosa-Neto P, Hansson O, Blennow K, Zetterberg H. Blood phospho-tau in Alzheimer disease: analysis, interpretation, and clinical utility. *Nat Rev Neurol* 2022; 18(7): 400-418.
- [4] Kivimäki M, Singh-Manoux A, Pentti J, Sabia S, Nyberg ST, Alfredsson L, Björner JB, Brunner EJ, Fransson EI, Goldberg M, Knutsson A, Koskenvuo M, Koskinen A, Kouvonen A, Kuula L, Oksanen T, Salo P, Shipley MJ, Stenholm S, Suominen S, Vahtera J, Väänänen A, Westerholm P, Zins M, Hamer M, Batty GD, Ferrie JE. Estimating Dementia Risk Using Multifactorial Prediction Models. *JAMA Network Open* 2023; 6(6): e2318132.
- [5] Bilal M, Iqbal HMN, Barceló D. Nanomaterials for the treatment and diagnosis of Alzheimer's disease: An overview. *NanoImpact* 2020; 20: 100251.
- [6] Scharre DW. Preclinical, prodromal, and dementia stages of Alzheimer's disease. *Pract Neurol* 2019; 15: 36-47.
- [7] Odusami M, Maskeliūnas R, Damaševičius R. Pixel-Level Fusion Approach with Vision Transformer for Early Detection of Alzheimer's Disease. *Electronics* 2023; 12(5): 1218.
- [8] Fathi S, Ahmadi M, Dehnad A. Early diagnosis of Alzheimer's disease based on deep learning: A systematic review. *Comput Biol Med* 2022; 146: 105634.
- [9] Sarraf S, Tofighi G, D'Souza AM, Phillips JM, Javanmardi M. OViTAD: Optimized vision transformer to predict various stages of Alzheimer's disease using resting-state fMRI and structural MRI data. *Brain Sci* 2023; 13(2): 260.
- [10] Henschel L, Conjeti S, Estrada S, Diers K, Fischl B, Reuter M. FastSurfer-a fast and accurate deep learning based neuroimaging pipeline. *NeuroImage* 2020; 219: 117012.

- [11] Puranik M, Khadidos A, Talukder A, Mohammed MA, Abbas Z, Alsadoon A, Ali S, Kannan A. Intelligent Alzheimer's detector using deep learning. In: 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS); 2018; IEEE.
- [12] Ilias L, Askounis D. Explainable identification of dementia from transcripts using transformer networks. *IEEE J Biomed Health Inf* 2022; 26(8): 4153-4164.
- [13] Jain V, Ha S, Jin K, Lee J, Jeong D. A novel AI-based system for detection and severity prediction of dementia using MRI. *IEEE Access* 2021; 9: 154324-154346.
- [14] Zhang X, Wang F, Chen X, Jiang T. An explainable 3D residual self-attention deep neural network for joint atrophy localization and Alzheimer's disease diagnosis using structural MRI. *IEEE J Biomed Health Inf* 2021; 26(11): 5289-5297.
- [15] Oktavian MW, Yudistira N, Ridok A. Classification of Alzheimer's Disease Using the Convolutional Neural Network (CNN) with Transfer Learning and Weighted Loss. *arXiv preprint arXiv:2207.01584*, 2022.
- [16] Ma H, Xu G, Wang J, Zhao Z, Liu Y, Liu X. Classification of Alzheimer's disease: application of a transfer learning deep Q-network method. *Eur J Neurosci* 2024.
- [17] Mujahid M, Khan MA, Hussain T, Ullah A, Shah JH, Naqvi SR, Balakrishnan V, Gwak J. An efficient ensemble approach for Alzheimer's disease detection using an adaptive synthetic technique and deep learning. *Diagnostics* 2023; 13(15): 2489.
- [18] Jack Jr CR, Bernstein MA, Fox NC, Thompson P, Alexander G, Harvey D, Borowski B, Britson PJ, Lainhart JE, Ward C, Dale AM. The Alzheimer's disease neuroimaging initiative (ADNI): MRI methods. *J Magn Reson Imaging* 2008; 27(4): 685-691.
- [19] Mueller SG, Weiner MW, Thal LJ, Petersen RC, Jack CR, Jagust W, Trojanowski JQ, Toga AW, Beckett L. The Alzheimer's disease neuroimaging initiative. *Neuroimaging Clin* 2005; 15(4): 869-877.
- [20] Petersen RC, Aisen PS, Beckett LA, Donohue M, Gamst AC, Harvey DJ, Jack CR, Jagust WJ, Shaw LM, Toga AW, Trojanowski JQ. Alzheimer's disease neuroimaging initiative (ADNI): clinical characterization. *Neurology* 2010; 74(3): 201-209.
- [21] Jiang J, Liu T, Xu X, Gao P, Fang Y. Deep learning based mild cognitive impairment diagnosis using structure MR images. *Neurosci Lett* 2020; 730: 134971.
- [22] Lian C, Liu M, Zhang J, Shen D. Attention-guided hybrid network for dementia diagnosis with structural MR images. *IEEE Trans Cybern* 2020; 52(4): 1992-2003.
- [23] Theekedath D, Sedamkar R. Detecting affect states using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 networks. *SN Comput Sci* 2020; 1: 1-7.
- [24] Yüzgeç E, Muhammed T. Alzheimer ve Parkinson Hastalıklarının Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2023; 35(2): 473-482.
- [25] Zoph B, Vasudevan V, Shlens J, Le QV. Learning transferable architectures for scalable image recognition. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*; 2018.
- [26] İlhan İ, Balı E, Karaköse M. An Improved DeepFake Detection Approach with NASNetLarge CNN. In: *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*; 2022. IEEE.
- [27] Pa WP, Nwe TL. Improving Myanmar Image Caption Generation Using NASNetLarge and Bi-directional LSTM. In: *2023 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA)*; 2023. IEEE.
- [28] Xu X, Li W, Duan Q. Transfer learning and SE-ResNet152 networks-based for small-scale unbalanced fish species identification. *Comput Electron Agric* 2021; 180: 105878.
- [29] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*; 2016.
- [30] Deepika D, Lakshmi AV. Identification of Breast Cancer Using RESNET152. In: *2022 Fourth International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP)*; 2022. IEEE.
- [31] Woo S, Kim DK, Lim J, Ghaffar A, Jang B, Han S, Choi J, Park J. Convnext v2: Co-designing and scaling convnets with masked autoencoders. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*; 2023.
- [32] Zhou J, Zhou W, Wei W, Zhu Y. YOLO-CIR: The network based on YOLO and ConvNeXt for infrared object detection. *Infrared Phys Technol* 2023; 131: 104703.
- [33] Zhang C, Feng C, Li Y, Lu C, Shi L, Wang H. Research on Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on Digital Twin Data and Improved ConvNext. *Sensors* 2023; 23(11): 5334.
- [34] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez AN, Kaiser Ł, Polosukhin I. Attention is all you need. *Adv Neural Inf Process Syst* 2017; 30.
- [35] Dosovitskiy A, Beyer L, Kolesnikov A, Weissenborn D, Zhai X, Unterthiner T, Dehghani M, Minderer M, Heigold G, Gelly S, Uszkoreit J, Houlsby N. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*, 2020.
- [36] Touvron H, Cord M, Douze M, Massa F, Sablayrolles A, Jégou H. Training data-efficient image transformers & distillation through attention. In: *International Conference on Machine Learning*; 2021. PMLR.
- [37] Wang W, Xie E, Li X, Fan D, Song K, Liang D, Lu T, Luo P, Shao L. Pyramid vision transformer: A versatile backbone for dense prediction without convolutions. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*; 2021.
- [38] Chen CFR, Fan Q, Panda R. Crossvit: Cross-attention multi-scale vision transformer for image classification. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*; 2021.



## Eksik Tahrikli Döner Ters Sarkaç Sisteminin Yukarı Yükseltmesi için Enerji Tabanlı Doğrusal Olmayan Kontrol Algoritması ve Deneysel Doğrulaması

Fatih ADIGÜZEL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

\*1 fadiguzel@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 08/01/2024;

Kabul/Accepted: 12/06/2024)

**Öz:** Bu çalışmada, döner ters sarkaç sistemi hareketli koluyla sınırlı bir bölge içinde, salınımı kontrol edilerek ve sarkaç enerjisi artırılarak, kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına çıkarılması hedeflenmektedir. Döner ters sarkaç sisteminin doğrusal olmayan modeli ve denge noktalarındaki doğrusal modelleri verildikten sonra sarkaç yukarı yükseltme algoritması tanıtılmaktadır. Yukarı yükseltme algoritması, sarkaç salınırken belli noktalarda kol yardımıyla sarkaca enerji yüklemesine dayanmaktadır. Burada kol ivmelendirilmesi sabit bir ivme ile hareket ettirilmektedir. Yukarı yükseltme işlemindeki algoritma, sarkacın hızının en fazla olduğu yere yani kararlı denge noktasına ilerlerken ve periyodunu tamamlarken devreye girmektedir. Bu analizler hesaplanmış sınırlar dikkate alınarak yapılmaktadır. Sarkacın yukarı yükselmesi gerçekleştiğinde doğrusal model üzerinden elde edilmiş temel bir tam durum geri beslemeli kontrolcü devreye girmektedir ve sarkacı kararsız denge noktasında tutmaktadır. Böylece, anahtarlamalı bir kontrol yapısı elde edilmektedir. Önerilen kontrol algoritmasının doğrulaması için önerilen algoritma bir döner sarkacı üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Farklı kol ivmelendirme değerleri ile elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Kol ivmesi  $\pm 32 \text{ rad/s}^2$ 'den  $\pm 64 \text{ rad/s}^2$ 'ye çıkarıldığında sarkacın yukarı yükseltme süresi yaklaşık 9 s'den 5 s'ye düşmektedir. Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın deneysel başarısını göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Döner sarkaç, enerji tabanlı yukarı yükseltme, kol ivmelendirme, doğrusal olmayan kontrol algoritması, LQR.

### Energy-Based Nonlinear Control Algorithm for Swing-Up of Underactuated Rotary Inverted Pendulum System and Its Experimental Verification

**Abstract:** This study aims to control the oscillation and increase the pendulum energy with the movable arm of the rotary inverted pendulum, swinging the pendulum up from a stable equilibrium point to an unstable equilibrium point in a restricted zone. After the nonlinear model of the rotary inverted pendulum system and the linear models at the equilibrium points are given, the pendulum swing-up algorithm is introduced. The swing-up algorithm is based on increasing energy into the pendulum with the help of an arm at certain points while the pendulum is swinging. At this point, the arm acceleration is moved by a constant acceleration. The algorithm of the swinging-up is activated when the pendulum completes its period and moves to the point of maximum speed where the stable equilibrium point. These analyses are made by taking calculated limits in these operations into account. When the pendulum swing-up is achieved, a classical full-state feedback controller obtained from the linear model comes into play and keeps the pendulum at the unstable equilibrium point. Thus, a switching control structure is obtained. To verify the proposed control algorithm, the proposed algorithm is carried out in real-time on a rotary inverted pendulum. The comparative results obtained with the different arm acceleration values are presented. When the arm acceleration is increased from  $\pm 32 \text{ rad/s}^2$  to  $\pm 64 \text{ rad/s}^2$ , the pendulum swing up time decreases from approximately 9 sec to 5 sec. These results demonstrate the experimental success of the proposed algorithm.

**Key words:** Rotary Pendulum, energy-based swing-up, arm acceleration, nonlinear control algorithm, LQR.

#### 1. Giriş

Döner ters sarkaç sistemi eksik tahrikli çalıştırılan doğrusal olmayan bir mekanik sistemdir. Eksik tahrikli döner ters sarkaç sistemi, farklı yaklaşımlara sahip kontrol tekniklerinin ve algoritmalarının etkinliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için deneysel bir düzenek olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Döner sarkacın kontrolü, kontrol teorisinde ortak bir örnektir ve ortak bir problem olarak tanımlanmaktadır [1, 2].

Döner ters sarkaç motor ucuna sistematik olarak eklenmiş açısız hareket eden bir çubuk ile buna tutturulmuş 360 derece dönebilen ikinci bir çubuktan oluşmaktadır. Döner ters sarkaç ilk olarak 1991 yılında Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde Katsuhisa Furuta tarafından icat edilmiştir. Günümüze kadar geliştirilmiş ve kontrol edilmiş farklı tiplerde ters sarkaç sistemleri vardır. Tek sarkaca sahip araba sarkaç sistemleri [3, 4], çift çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri [5], tek ve çift çubuklu döner ters sarkaç sistemleri [6, 7], sarkaç ucuna bağlı olan bir tekerin

\* Sorumlu yazar: [fadiguzel@yildiz.edu.tr](mailto:fadiguzel@yildiz.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2161-690X



dönmesi sonucu kuvvetin uygulandığı sarkaç sistemleri, tek kollu ve çiftli paralel çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri, gezgin ters sarkaç sistemleri, seri robotlarla kontrol edilen ters sarkaç sistemleri literatürde ön plana çıkan sistemlerdir.

Eksik tahrikli mekanik sistemlerin kontrolü yıllardır mühendislik camiasının ilgisini çekmektedir. Bu sistemler, serbestlik dereceleri yönünden daha az kontrol girişli (eksik tahrikli) olan mekanik sistemlerdir. Girişlerin bu eksikliği, onları kontrol etmedeki temel zorluktur. Ayrıca, eksik tahrikli mekanik sistemlerin kontrolü; robotik, uzay ve deniz araçlarındaki geniş uygulamaları nedeniyle halen aktif bir araştırma alanıdır. Bazı örnekleri; esnek bağlantılı robotlar, mobil robotlar, yürüyen robotlar, mobil platformlardaki robotlar, arabalar, lokomotif sistemleri, yılan-tipi ve yüzen robotlar, akrobatik robotlar, uçaklar, uzay aracı, helikopterler, uydular, yüzey tekneleri ve sualtı araçlarıdır [2, 7].

Döner ters sarkaç sisteminin iki denge noktası vardır. Biri kararlı denge noktası, diğeri ise kararsız denge noktasıdır. Sistemin kararlı denge noktası sarkacın aşağı halde durduğu durumu göstermektedir. Herhangi bir kontrol kuvveti yokluğunda sistem, doğal olarak bu duruma geri dönmektedir. Sistemin kararsız denge noktası ise 90 derecelik açıyla sahip olduğu yukarı haldeki pozisyonudur. Buradaki problem kararsız denge noktasında sistemin sabit tutulma isteği için sistemin modellenmesi, kontrol sisteminin oluşturulmasıdır. Literatürde, döner ters sarkaç sisteminin ana kontrol hedefleri arasında yukarı yükseltme ve kararsız denge noktasının kararlı kılacak kontrol tasarımları en çok öne çıkan problemlerdir [8, 9]. Antonio-Cruz vd. [10] tarafından yukarı yükseltme probleminde statik sürtünme yerine dinamik sürtünme problemi ele alınmıştır. Bir diğer çalışmada Docekal vd. [11] ters sarkaç sisteminin enerji tabanlı yukarı yükseltmesi ve kararsız denge noktasında kararlı kılınması için ileri bir LQR yöntemi önermişlerdir. Yang vd. [12] ise enerji tabanlı yukarı yükseltme çözümü için Bang-Bang kontrol yöntemine karşı yörünge planlamalı sarkaç yukarı yükseltmesi yapmıştır. Yukarı yükseltme kısmını ele almayıp sadece kararsız denge noktasının kontrolü üzerine kesirli dereceli PID kontrol yapısı Dwivedi vd. [13] tarafından önerilmektedir. Kararlı kılma problemi için doğrusal olmayan bir kontrol yapısı Türker vd. [14] önermektedir. Ayrıca, doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol yapılarının birlikte kullanılması ile elde edilen anahtarlamalı kontrol yapıları üzerine literatürde çalışmalar mevcuttur [15, 16]. Abdullah vd. [17] döner ters sarkaç için sundukları anahtarlamalı bir kontrol yapısını enerji algoritması, LQR ve bulanık mantık kontrol yapılarının bileşiminden elde etmişlerdir. Bunların yanında, ters sarkaç sistemlerinde yörünge takibi ile denge kontrolü farklı kontrol yapıları ile ele alınmıştır: kayan kipli kontrol [18], yapay sinir ağı temelli model referans kontrol [19], uyarlamalı bulanık tabanlı kayan kipli kontrol [20]. Bahsedilen çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kolun farklı ivmelendirme seviyeleri ile sarkaç yukarı yükseltme zamanının düşürülmesi ele alınmaktadır ve kol limitleri göz önünde bulundurulmaktadır.

Döner ters sarkaç sisteminin yukarı yükseltmesi için literatürde genel olarak tercih edilen enerji tabanlı algoritmaların farklı performans kriterlerini ön planda tutan geliştirilmiş versiyonları mevcuttur. Åström vd. [21] minimum zaman anlayışı ve minimum zaman çözümlerinin dayanıklılığı ile ters sarkaç sisteminde yukarı yükseltme problemini çözmüşlerdir. Başka bir çalışmada Freidovich vd. [22] kısmi enerji şekillendirmeli kontrol ile Furuta sarkacının kararlı kılınması ele almışlardır. Gordillo vd. [23] hız-düşüm algoritmasını bahsedilen problemin çözümü için önermişlerdir. Mevcut enerji tabanlı kontrol çözümünden farklı olarak, Tanaka vd. [24] öncelikle kontrol yasında tekil noktalardan kaçınmak için gerek ve yeter koşullarından bahsetmişlerdir ve sarkacın küresel hareket analizini gerçekleştirmişlerdir.

Döner sarkaç sistemi ikinci derecen doğrusal olmayan eksik tahrikli bir sistem olduğu için çeşitli derleme çalışmalarında yer almıştır [25, 26]. Ayrıca özel olarak da döner ters sarkaç sistemi için derleme çalışması mevcuttur [27]. Bu çalışmaların ifade ettiği güncel çalışmaların yanında, yukarı yükseltme işleminin kararsız denge noktasının belli bir komşuluğuna kadar yapılmasından sonra hızlı oturma zamanının elde edilmesi için çeşitli doğrusal olmayan yöntemler önerilmiştir. Nguyen vd. [28] tarafından değiştirilmiş kayan kipli kontrol ve Nguyen vd. [29] tarafından bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol geliştirilmiştir. Eksik tahrikli yapılarından dolayı doğrudan geri adımlamalı kontrol yapısının uygulanmadığı döner sarkaç sistemi için modelden bağımsız geri adımlamalı kontrol [30] ve geri adımlamalı kayan kipli kontrol [31] yapıları kararlı kılma problemi için önerilmiştir. Bu çalışmada ise döner ters sarkaç sistemi için önceden belirlenmiş kol sınırları içerisinde sarkacın yukarı yükseltmesi hedeflenmektedir ve kararlı kılma problemi ise geleneksel bir yaklaşım olan tam durum geri beslemeli kontrol yapısı ile ele alınmaktadır.

Bu çalışmada, döner ters sarkaç sisteminde sarkacın yukarı yükseltmesi için doğrusal olmayan durum beslemeli kontrolcü sonrasında sarkacın enerjisinin şekillendirilmesine dayalı bir kontrol algoritması sunulmaktadır. Bahsedilen algoritmada, sarkaç salınımlarında belli noktalarda kol yardımıyla sarkaca enerji yüklemesi gerçekleştirilmektedir. Ters sarkaç sisteminin kol ivmelendirilmesi sabit bir ivme ile hareket ettirilmektedir ve bu şekilde enerji yüklemesi yapılmaktadır. Burada üzerine durulması gerekli bir diğer nokta sabit kol ivmelendirmesinin değişimi ile sarkacın yukarı çıkma süresinin değişmesidir. Sabit kol ivmesinin artırılması sarkacın yukarı yükseltme süresini azaltmaktadır. Yukarı yükseltme işlemindeki algoritma, sarkacın hızının en fazla olduğu yere yani kararlı denge noktasına ilerlerken ve sarkaç periyodunu tamamlarken devreye alınmaktadır.

Bahsedilen kritik analizler hesaplanmış sınırlar dikkate alınarak yapılmaktadır. Sarkaç yukarı yükseltme problemini farklı kol ivme değerleri ile üstesinden gelen algoritma önerisi sonrasında, sarkaç kararsız denge noktasının belli komşuluğunda, MATLAB/LQR yazılımı ile kontrolcü kazançları elde edilmiş tam durum geri beslemeli kontrol devreye girmektedir. Böylece bu çalışmada, kararlı kılma problemi ile anahtarlamalı bir kontrol yapısı önerilmektedir. Son olarak, sunulan kontrol algoritmasının doğrulaması için, önerilen algoritma bir döner sarkacı üzerinde gerçek zamanlı olarak çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçları önerilen algoritmanın başarısını göstermektedir.

## 2. Döner Ters Sarkaç Sistemin Modellenmesi ve Doğrusallaştırılması

Bu bölümde, döner ters sarkaç sisteminin hem doğrusal olmayan hem de denge noktalarında doğrusal modelleri verilmektedir. İki farklı modelin elde edilmesinin temel sebebi, sarkacın enerjisini yükseltecek kontrol algoritması sistemin doğrusal olmayan modeli üzerinden gerçekleştirilmesidir. Dahası, sarkaç kararsız denge noktasına yükseltilmesinden sonra doğrusal model üzerinden tam durum geri beslemeli kontrol devreye girmektedir. Başka bir ifade ile anahtarlamalı bir kontrol yapısının inşa edilmektedir.

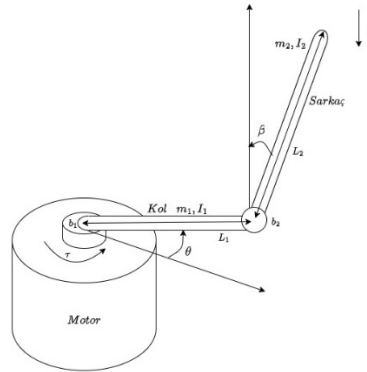
### 2.1. Döner Ters Sarkaç Sisteminin Modellenmesi

Döner ters sarkaç sisteminin modellenmesi iki değişken üzerinden yapılmaktadır. Bu parametrelerden birincisi döner kolun yatay eksenindeki açısı, diğeri ise sarkacın dik eksenindeki açısıdır. Döner ters sarkaç sisteminin genel gösterimi Şekil 1’de sunulmaktadır. Tablo 1’de döner sarkaç sisteminin parametre değişken isimleri, değerleri ve birimleri verilmektedir.

Döner ters sarkaç sistemi gibi mekanik sistemlerin Newton yasası ile modelinin çıkarılması oldukça zordur. Bunun en temel sebebi, Newton mekaniğindeki kuvvetler ve kısıtlamalar yerine Euler-Lagrange mekaniğinde enerjilerin ve genelleştirilmiş koordinatların kullanılmasıdır. Birçok çalışmada genelleştirilmiş koordinat sistemi ile enerjinin şekillendirildiği sistemlerde denklem (1)’deki Euler-Lagrange formülasyonu kullanılmaktadır. Euler-Lagrange eşitliği,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

şeklindedir. Bu denklemde  $\mathcal{L}$  Lagrange sembolünü,  $q_i$  sistemin genelleştirilmiş koordinatları,  $Q_i$  sistemdeki dış kuvvetleri temsil etmektedir. Euler-Lagrange eşitliği her iki koordinat değişkeni için de ilerleyen aşamada yazılmaktadır. Euler-Lagrange eşitliği sistemin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki fark ile hesaplanmaktadır.  $q_1$  sarkaç açısını ve  $q_2$  kol açısını ifade etmek üzere bu açılar denklem (2)’de belirtilmektedir.



Şekil 1. Döner ters sarkaç sisteminin şematik diyagramı.

**Tablo 1.** Döner sarkaç sisteminin parametre listesi.

Tanım	Sembol	Değer	Birim
Yerçekimi ivmesi	$g$	9,81	$m.s^{-2}$
Kolun kütlesi	$m_1$	0,125	kg
Sarkacın kütlesi	$m_2$	0,01	kg
Kol uzunluğu	$L_1$	0,515	m
Sarkaç uzunluğu	$L_2$	0,215	m
Kolun kütle merkezinin dönme noktasına uzaklığı	$l_1$	0,2575	m
Sarkacın kütle merkezinin dönme noktasına uzaklığı	$l_2$	0,1075	m
Kolun ataleti	$I_1$	0,0014	$kg.m^2$
Sarkacın ataleti	$I_2$	$1,9260 \times 10^{-5}$	$kg.m^2$
Sarkaç ile kol arasındaki sürtünme katsayısı	$b_1$	$420 \times 10^{-6}$	$N.m.rad^{-1}$
Kol ile yüzey arasındaki sürtünme katsayısı	$b_2$	$380 \times 10^{-5}$	$N.m.rad^{-1}$

$$(q_1, q_2) = (\beta, \theta). \quad (2)$$

Sarkaç kolunun kinetik enerjisi denklem (3)'te verilmektedir ve sarkaç koluna ait kinetik enerji düzenlenirse denklem (4) elde edilmektedir.

$$T_1 = \frac{1}{2}m_1\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}^2. \quad (3)$$

$$T_1 = \frac{1}{2}m_1L_1^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}^2. \quad (4)$$

Sarkacın kinetik enerjisi denklem (5)'te yazılmaktadır. Sarkaca ait kinetik enerji düzenlenirse denklem (6) elde edilmektedir.

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}I_2\dot{\beta}^2. \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2 \left[ (L_1\dot{\theta} + l_2 \cos \beta \dot{\beta})^2 + (l_2 \sin \beta \dot{\beta})^2 \right] + \frac{1}{2}I_2\dot{\beta}^2. \quad (6)$$

Sistemin toplam kinetik enerjisi (7)'deki denklem ile yazılabilmektedir.

$$T = T_1 + T_2. \quad (7)$$

$T_1$  ve  $T_2$  ifadelerini düzenlenir ve denklem (7)'de yerlerine yazılırsa, sisteme ait kinetik enerji bulunabilmektedir.  $T$  toplam kinetik enerji ifadesi denklem (8)'de ve denklem (9)'da hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{1}{2}m_1L_1^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m_2 \left[ (L_1\dot{\theta} + l_2 \cos \beta \dot{\beta})^2 + (l_2 \sin \beta \dot{\beta})^2 \right] + \frac{1}{2}I_2\dot{\beta}^2. \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{2} \left[ (I_2 + m_2l_2^2)\dot{\beta}^2 + 2m_2l_2L_1 \cos \beta \dot{\beta} \dot{\theta} + (I_1 + m_1L_1^2 + m_2L_1^2 + m_2l_2^2 \sin^2 \beta)\dot{\theta}^2 \right]. \quad (9)$$

Döner kol yalnızca yatay ekseninde hareket ettiği için sistemin potansiyel enerjisini yalnızca sarkaç belirlemektedir. Denklem (10)'da sistemin potansiyel enerjisi verilmektedir.

$$V = m_2l_2g \cos \beta. \quad (10)$$

Sistemin Lagrange fonksiyonu (9) ve (10) denklemleri kullanarak denklem (11)'de verilmektedir.

$$\mathcal{L} = T - V. \quad (11)$$

Böylece, sisteme ait Lagrange fonksiyonu (12) denklemi ile elde edilmektedir.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} [(I_2 + m_2 l_2^2) \dot{\beta}^2 + 2m_2 l_2 L_1 \cos \beta \dot{\beta} \dot{\theta} + (I_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + m_2 l_2^2 \sin^2 \beta) \dot{\theta}^2] - m_2 l_2 g \cos \beta. \quad (12)$$

Sarkaç açısı  $\beta$  için hareket denklemi, denklem (13)'de verilmektedir ve denklem (14)'te bu denklemin düzenlenmiş hali verilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \beta} = Q_\beta. \quad (13)$$

$$H_1 \ddot{\beta} + H_2 \cos \beta \ddot{\theta} - H_3 \sin \beta \cos \beta \dot{\theta}^2 - H_4 g \sin \beta = -b_1 \dot{\beta}. \quad (14)$$

Kol açısı  $\theta$  için hareket denklemi, denklem (15)'te ve denklem (16)'da sunulmaktadır.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = Q_\theta. \quad (15)$$

$$H_2 \cos \beta \ddot{\beta} + (H_5 + H_3 \sin^2 \beta) \ddot{\theta} - H_2 \sin \beta \dot{\beta}^2 + 2H_3 \sin \beta \cos \beta \dot{\beta} \dot{\theta} = \tau - b_2 \dot{\theta}. \quad (16)$$

Buradaki  $\tau$  kontrol sinyalini göstermektedir. Bu gösterimde  $H_1, H_2, H_3, H_4$  ve  $H_5$  ifadelerinin açılımları denklem (17)'deki denklemlerle gösterilmektedir.

$$H_1 = I_2 + m_2 l_2^2, \quad H_2 = m_2 l_2 L_1, \quad H_3 = m_2 l_2^2, \quad H_4 = m_2 l_2, \quad H_5 = I_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2. \quad (17)$$

Mekanik sistemlerin hareket denklemlerini genel olarak yazarsak [33];  $M(q)$  atalet matrisini,  $C(q, \dot{q})$  merkezkaç ve Coriolis kuvvetlerinin etkisini,  $G(q)$  ise yerçekimi kuvvetlerini ifade etmek üzere, döner ters sarkacının konfigürasyon alanı denklem (18)'deki biçimde tanımlanmıştır:

$$q = [\theta, \beta]^T \in S^1 \times S^1, \quad S^1 = [0, 2\pi). \quad (18)$$

U kontrol giriş vektörü olmak üzere, sistem hareketinin Euler-Lagrange ile elde edilmiş hareket dinamiği denklem (19)'da ve denklem (20)'de yazılabilmektedir [14, 33]:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = U. \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \cos(\beta) \\ H_2 \cos(\beta) & H_5 + H_3 \sin^2(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\beta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -H_3 \sin(\beta) \cos(\beta) \dot{\theta} \\ -H_2 \sin(\beta) \dot{\beta} + H_3 \sin(\beta) \cos(\beta) \dot{\theta} & H_3 \sin(\beta) \cos(\beta) \dot{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -H_4 g \sin(\beta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \dot{\beta} \\ \tau - b_2 \dot{\theta} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Ayrıca  $M(q)$  atalet matrisi aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır:

- 1)  $M(q)$  pozitif ve simetrik bir matristir ( $M > 0, M = M^T$ ).
- 2)  $\left( \frac{1}{2} \dot{M} + C \right)$  ifadesi ters simetrik bir matristir.

## 2.2. Döner Ters Sarkaç Sisteminin Durum-Uzay Modeli

Döner ters sarkaç sistem modeli toplam dört tane birinci dereceden diferansiyel denklem olarak yazılabilmektedir. Bu denklemlerdeki durum değişkenleri denklem (21)'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

buradaki  $x_1$  sarkaç açısı,  $x_2$  sarkaç açısal hızı,  $x_3$  kolun açısı ve  $x_4$  kolun açısal hızını ifade etmektedir.

Sistem durumlarından  $x_1$  ve  $x_3$ 'ün eşitleri bilinmektedir. Sistemde doğrusal olmayan etkileri barındıran  $x_2$  ve  $x_4$  durumlarının bulunması için, yazdığımız tüm model denklemi M matrisinin tersi ile çarpılırsa bu iki durum elde edilmiş olmaktadır. M matrisinin tersi denklem (22)'de ve sistemin  $M^{-1}$  ile çarpımı denklem (23)'de verilmektedir.

$$M^{-1} = \frac{1}{H_1 H_5 - H_2^2 \cos^2(x_1) + H_1 H_3 \sin^2(x_1)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_5 + H_3 \sin^2(x_1) & 0 & -H_2 \cos(x_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -H_2 \cos(x_1) & 0 & H_1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = M^{-1} \left( \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) x_4 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & H_2 \sin(x_1) x_2 - H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) x_4 & 0 & -H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ H_4 g \sin(x_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 x_2 \\ 0 \\ \tau - b_2 x_4 \end{bmatrix} \right). \quad (23)$$

Sonuç olarak, sistemin durum-uzay modeli denklem (24)'te elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{H_1 H_5 - H_2^2 \cos^2(x_1) + H_1 H_3 \sin^2(x_1)} \left( \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & c & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ e \\ 0 \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \\ i \end{bmatrix} \right). \quad (24)$$

Burada (24) denklemindeki parametrik değişkenler (25)-(32) denklemlerinde verilmektedir.

$$a = -H_2 \cos(x_1) (H_2 \sin(x_1) x_2 - H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) x_4). \quad (25)$$

$$b = H_2 H_3 x_2 \cos^2(x_1) \sin(x_1) + H_3 x_4 \cos(x_1) \sin(x_1) (H_5 + H_3 \sin^2(x_1)). \quad (26)$$

$$c = H_1 (H_2 x_2 \sin(x_1) - H_3 x_4 \cos(x_1) \sin(x_1)). \quad (27)$$

$$d = -H_1 H_3 x_2 \cos(x_1) \sin(x_1) - H_2 H_3 x_4 \cos^2(x_1) \sin(x_1). \quad (28)$$

$$e = gH_4 \sin(x_1) (H_5 + H_3 \sin^2(x_1)). \quad (29)$$

$$f = -gH_2H_4 \cos(x_1) \sin(x_1). \quad (30)$$

$$h = -H_2(\tau - b_2x_4) \cos(x_1) + b_1x_2(H_5 + H_3 \sin^2(x_1)). \quad (31)$$

$$i = H_1(\tau - b_2x_4) - b_1H_2x_2 \cos(x_1). \quad (32)$$

### 2.3. Döner Ters Sarkaç Sisteminin Doğrusal Modeli

U giriş vektörü olmak üzere, döner ters sarkaç sisteminin doğrusal modeli  $\dot{X} = f(X, U)$  şeklinde bir modeldir. Bu modelin doğrusallaştırılmasındaki yöntem,  $\dot{X} = f(X, U)$ ,  $f, X \in \mathbb{R}^n$ ;  $U \in \mathbb{R}^m$  için referans noktası  $(X_0, U_0)$  etrafında doğrusallaştırıldığında;  $\dot{X} = AX + BU$  için A ve B matrisleri (33) ve (34) denklemlerinde sırasıyla verilmektedir.

$$A_{n \times n} = \left[ \frac{\partial f}{\partial X} \right]_{(X_0, U_0)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{(X_0, U_0)}. \quad (33)$$

$$B_{n \times m} = \left[ \frac{\partial f}{\partial U} \right]_{(X_0, U_0)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix}_{(X_0, U_0)}. \quad (34)$$

Döner ters sarkaç sisteminin kararlı denge noktasındaki doğrusallaştırılmış modeli, sarkacı yukarı kaldırma probleminde, kolun sabit ivme hareketi için ivme hesabında kullanılacaktır. İvme hesabındaki bu sınırlama, sarkacın kararlı denge noktasındaki salınım periyodu içerisinde kolun bir sınır noktasından diğerine hareket etmesine bağlıdır.

Kararlı denge noktası  $(x_1, x_3) = (\pi, 0)$  etrafında doğrusal hale getirildiğinde; sistem A ve B matrisleri (35) ve (36) denklemlerinde sırasıyla elde edilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{gH_4H_5}{-H_2^2 + H_1H_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{gH_2H_4}{-H_2^2 + H_1H_5} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{H_2}{H_2^2 - H_1H_5} \\ 0 \\ \frac{H_1}{-H_2^2 + H_1H_5} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Döner ters sarkaç sisteminin enerjisi artırılarak sarkaç adım adım kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına doğru hareket ettirilmesi hedeflenmektedir. Bu hareket çalışmaları sonucunda sistem istenilen noktaya yani kararsız denge noktasına getirildiğinde sistem kolu doğrusallaştırılmış model üzerinden çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak bu noktada dengede tutulmaya çalışılmaktadır.

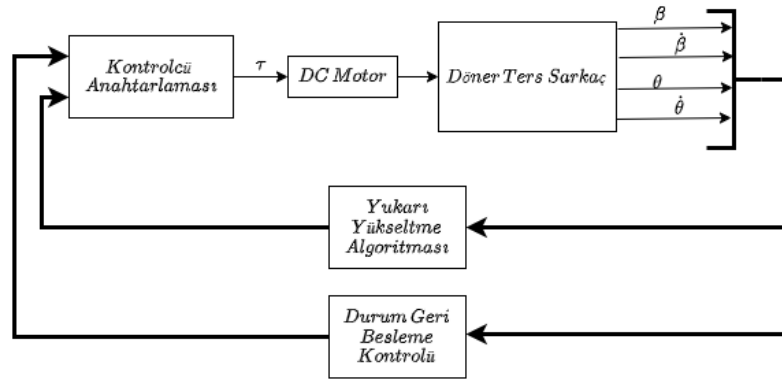
Kararsız denge noktası  $(x_1, x_3) = (0, 0)$  etrafında doğrusallaştırıldığında; sistem A ve B matrisleri (37) ve (38) denklemlerinde sırasıyla elde edilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{gH_4H_5}{-H_2^2+H_1H_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{gH_2H_4}{-H_2^2+H_1H_5} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{H_2}{H_2^2-H_1H_5} \\ 0 \\ \frac{H_1}{-H_2^2+H_1H_5} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

### 3. Kontrol Algoritması

Bu bölümde sarkacın enerjisini artırmak için kolun hareketine bağlı oluşturulan algoritma verilmektedir. Bir önceki bölümde açıklandığı üzere, sarkacın enerjisini değiştirmek ve kolun belirlenen sınırlar arasında kalmasını sağlamak için, kol belli zaman ve konum aralıklarında ivmelendirilmektedir. Önerilen kontrol yapısının diyagramı Şekil 2’de resmedilmektedir.



Şekil 2. Kontrol yapısının şematik diyagramı.

#### 3.1 Doğrusal Olmayan Terimlerin Sadeleştirilmesi

Döner ters sarkaç sistem modelini gösteren denklem (14) ve denklem (16) göz önüne alınarak, sistem kontrol girişi olarak değerlendirdiğimiz  $\tau$  ifadesini (39) denklemine aşağıdaki şekilde tasarlanabilir:

$$\tau = \frac{H_2H_3}{H_1} \sin(x_1) \cos^2(x_1) \dot{x}_3^2 + \frac{H_2H_4g}{H_1} \sin(x_1) \cos(x_1) + 2H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) \dot{x}_1 \dot{x}_3 - H_2 \sin(x_1) \dot{x}_1^2 + \left( H_5 + H_3 \sin^2(x_1) - \frac{H_2^2}{H_1} \cos^2(x_1) \right) u. \quad (39)$$

Böylece kontrol girişi olarak (39) denklemine verilen kontrol girişinin sisteme uygulanması ile doğrusal olmayan modelde doğrusal olmayan terimlerin sadeleştirilmesi gerçekleştirilmektedir. Buradaki  $u$  yeni kontrol girişi olarak kabul edilmektedir.

Sisteme doğrusal olmayan terimlerin sadeleştirilmesi yöntemi uygulandığında sistemin kendi dinamikleri kullanılarak, uygulanan kontrol girişi üzerinden sistem içerisindeki doğrusal olmayan kısımlar sadeleştirilmektedir. Yani sistem dinamikleri üzerinden kolun hızına doğrudan etki edebilir hale gelmektedir. Sistemin kısmi doğrusallaştırılmış model dinamiği (40) ve (41) denklemlerinde verilmektedir.

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{H_1} (-H_2 \cos(x_1) \ddot{x}_3 + H_3 \sin(x_1) \cos(x_1) \dot{x}_3^2 + H_4 g \sin(x_1)). \quad (40)$$

$$\ddot{x}_3 = u. \quad (41)$$

Burada önerilen ön kontrol yapısı, Nguyen vd. [28] tarafından gerçekleştirilmiş geri besleme ile doğrusallaştırma kontrolcüsünün bir versiyonudur.

### 3.2 Enerji Tabanlı Algoritmanın Tasarımı

Döner ters sarkaç farklı bir isimle Furuta sarkaç için minimum enerjili olarak sarkaç yukarı yükseltme problemi detayları ile Fantoni vd. [32] tarafından ele alınmaktadır. Döner sarkaç sistemin enerjisinin artmasını hedeflediğimiz bu çalışmada enerji fonksiyonunun türevinin belli koşullar altında her zaman sıfırdan büyük olduğunu gösterecek ve kol limitlerini dikkate alacak bir algoritma bulunması hedeflenmektedir. Böylece, ters sarkacın yukarı yükseltme problemi başarıyla çözülecektir. Sarkaca ait enerji fonksiyonu [21] denklem (42)'de

$$E_{pen} = \frac{1}{2} H_1 \dot{x}_1^2 + H_4 g \cos(x_1) \quad (42)$$

biçiminde elde edilmektedir. Ayrıca denklem (40) kullanılarak, sarkacın enerji fonksiyonunun türevi denklem (43)'de hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}_{pen} = H_2 \cos(x_1) \dot{x}_1 \left( -u + \frac{H_3}{H_2} \sin(x_1) \dot{x}_3^2 \right). \quad (43)$$

Bu noktada  $\frac{H_3}{H_2} \sin(x_1) \dot{x}_3^2$  ifadesi, sarkacın denge noktaları civarında sıfıra yakın değerler alacağı düşünülerek ihmal edilip, yeni kontrol sinyali denklem (44)'te

$$u = -\frac{k \operatorname{sign}(\cos(x_1) \dot{x}_1)}{H_2} \quad (44)$$

seçimi ile denklem (43) denklem (45) halini almaktadır.

$$\dot{E}_{pen} = k |\cos(x_1) \dot{x}_1|. \quad (45)$$

Tasarım parametresi olan  $k$  değerinin seçimi ile sarkaç enerjisi istenilen şiddete ve yönde değiştirilebilmektedir. Dikkat edilmesi gereken nokta eğer  $k > 0$  ise enerjinin artacağı, aksi durumda  $k < 0$  ise enerjinin azalacağı söz konusudur. Sarkaç enerjisinin değiştirilmesi için  $k$  sabit seçilmesine gerek yoktur, ancak bu çalışmada sabit seçilmektedir. Böylece sabit bir  $k$  seçimi ile yapılacak analizler oldukça kolaylaşmaktadır. Ayrıca denklem (45)'teki  $\cos(x_1) \dot{x}_1$  teriminin en büyük değerinin sarkaç kararlı denge noktasından geçerken alacağı anlaşılmaktadır. Yani sarkaç kararlı denge noktasından geçerken enerji en yüksek verimlilikle ayarlanabilmektedir. Bu sebepten dolayı sarkaç bu nokta civarında iken kol hareket ettirilmeye başlanacaktır. Böylece  $\frac{H_3}{H_2} \sin(x_1) \dot{x}_3^2$  ifadesinin ihmal edilmesinin analize etkisi de azaltılmış olmaktadır.

Sarkacın salınım hareketine bakıldığında, sarkaca en büyük enerji aktarımı önceki bölümlerde de belirtildiği üzere sarkaç kararlı denge noktasından geçerken gerçekleşmektedir ( $\cos(x_1) = 1$ ). Bu durumda  $|\dot{x}_1|$  maksimum değerini alacaktır. Sarkaç kararlı denge noktasından geçerken enerji en yüksek değerine ulaşacağı için, kol bu noktada sabit bir ivme ile hareketlendirilecektir. Böylece enerjinin artırılması sağlanmış olacaktır. Fakat sarkacın enerji değişimi esnasında kol ivmesinin yön değiştirmemesi gerekmektedir. Fakat bu durumda da kol açısı belirlenen sınır değerlerin dışına çıkabilmektedir. Bunun önüne geçmek üzere, sarkacın enerji artırımı en verimli nokta olan kararlı denge noktası civarında başlatılacaktır. Kolun olası en büyük sabit ivme değerini yaklaşık olarak elde etmek üzere, sarkacın çeyrek periyot hareketi hesaplanarak, kolun bu kadar sürede hareketinin yarısını tamamlaması için hesaplamalar gerçekleştirilecektir. O halde, bu sabit ivme hareketinin süresi için sarkacın kararlı denge noktasındaki doğrusal modeli üzerinden salınım periyodu hesaplanmalıdır. Bu hesaplama sarkaç denklemlerinin kararlı denge noktasında doğrusallaştırılması ile yapılacaktır. Sistem modeli denklem (14)'te ve denklem (16)'da doğrusal olmayan denklemlerdir. Bu denklemlerin kararlı denge noktasındaki  $(x_1, x_3) = (\pi, 0)$  doğrusal modelinden (46) ve (47) denklemleri elde edilmektedir.

$$\ddot{x}_1 = \frac{g H_4 H_5}{H_2^2 - H_1 H_5} x_1 - \frac{H_2}{H_2^2 - H_1 H_5} \tau. \quad (46)$$



$$\ddot{x}_3 = \frac{gH_2H_4}{H_2^2 - H_1H_5} x_1 - \frac{H_1}{H_2^2 - H_1H_5} \tau. \quad (47)$$

Bu denklemler sarkaç dinamiği kontrol girişinin sıfır olması durumu ile düşünüldüğünde, sarkacın doğrusal modeli Tablo 1'deki değerlere göre sayısal olarak (48) denkleminde hesaplanmaktadır.

$$\ddot{x}_1 = -200,8691 x_1. \quad (48)$$

Kararlı denge noktasındaki doğrusallaştırılmış model üzerinden sarkacın izleyeceği yol (49) denkleminde verilmektedir.

$$x_1 = \alpha \cos(\omega t + \phi). \quad (49)$$

Denklem (49)'u denklem (48)'e eşit hale getirmek için denklem (49)'un türevi alınır (50) ve (51) denklemleri elde edilmektedir.

$$\ddot{x}_1 = -\omega^2 \alpha \cos(\omega t + \phi). \quad (50)$$

$$\ddot{x}_1 = -\omega^2 x_1. \quad (51)$$

(48) ve (51) denklemlerinden salınım açısal frekansı (52) denkleminde elde edilmektedir.

$$\omega = 14,1728. \quad (52)$$

Buradan sistemin salınım periyodu (53) denkleminde hesaplanabilmektedir

$$T_{py} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (53)$$

Hesaplanan periyot, sarkaç salınıminin yarı periyodudur. Buradan yarı periyot  $T_{py} = 0,4432$  s, periyot  $T_p = 0,8864$  s olarak bulunmaktadır. Böylece, doğrusal model üzerinden salınım periyodu elde edilmiş olmaktadır. Deneysel olarak elde edilen periyot ise  $T_p = 0,888$  s hesaplanmıştır.

Doğrusal model üzerinden hesaplanan periyot, doğrusal olmayan modelin periyodu düşünüldüğünde her zaman daha az veya eşit bir değer olacaktır, çünkü gerçekte kullanılan model doğrusal değildir ve sarkacın periyodu doğrusal model periyodundan fazladır. Hatta sarkaç, salınım yaparken enerjisi arttıkça bu süre de artacaktır. Bu nedenle, doğrusal model üzerinden hesaplanan salınım süresi doğrusal olmayan modelin salınım süresinin bir alt sınırı olarak düşünülebilmektedir. Bu alt sınır periyodu süresinde kol en fazla sınır değerleri arasında kalacak şekilde hareket etmelidir. Bu hareketin yapılması için sınırlanan bölge ve sarkacın fiziksel değerlerine bağlı olan salınım periyodu için ivme sınır değerini bize vermektedir.

Kol, sarkaç alt denge noktasından geçerken sabit ivme ile hızlandırılmaktadır. Bu hızlandırma işlemi sarkacın açısal hızının yönü aynı iken yere paralel duruma gelmesi veya açısal hızının yönünün değişmesi, sarkacın enerji değişim yönünün değişimine sebep olmaktadır. Bu aşamada kol ivmesi tersi yönde uygulanırsa enerji değişimi istenilen yönde devam ettirilmektedir.

Sabit ivme hareketi için zamana bağlı kol hareket denklemi (54) denkleminde elde edilmektedir.

$$x_3(t) = x_3(t_0) + \dot{x}_3(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2} a(t - t_0)^2. \quad (54)$$

Burada,  $a$  kol için uygulanan sabit ivmedir. Sırasıyla kol açısı ve kol açısal hızının başlangıç değerleri  $x_3(t_0) = 0$  ve  $\dot{x}_3(t_0) = 0$  kabul edilirse ve kol için hareket sınırı  $-x_{3lim} < x_3 < x_{3lim}$ ,  $x_{3lim} > 0$  olmak üzere tanımlanırsa (55) denklemi ile verilen denklem elde edilmektedir.

$$\frac{1}{2} a(t - t_0)^2 = 2x_{3lim}. \quad (55)$$

(55) denklemi sağlandığında kol sınırlar arasında kalacaktır. Denklem (55) ile geçen süre yani  $(t - t_0) = \frac{T_p}{4}$  olduğunda, sarkaç salınım ivmesi için (56) denklemi yazılabilmektedir.

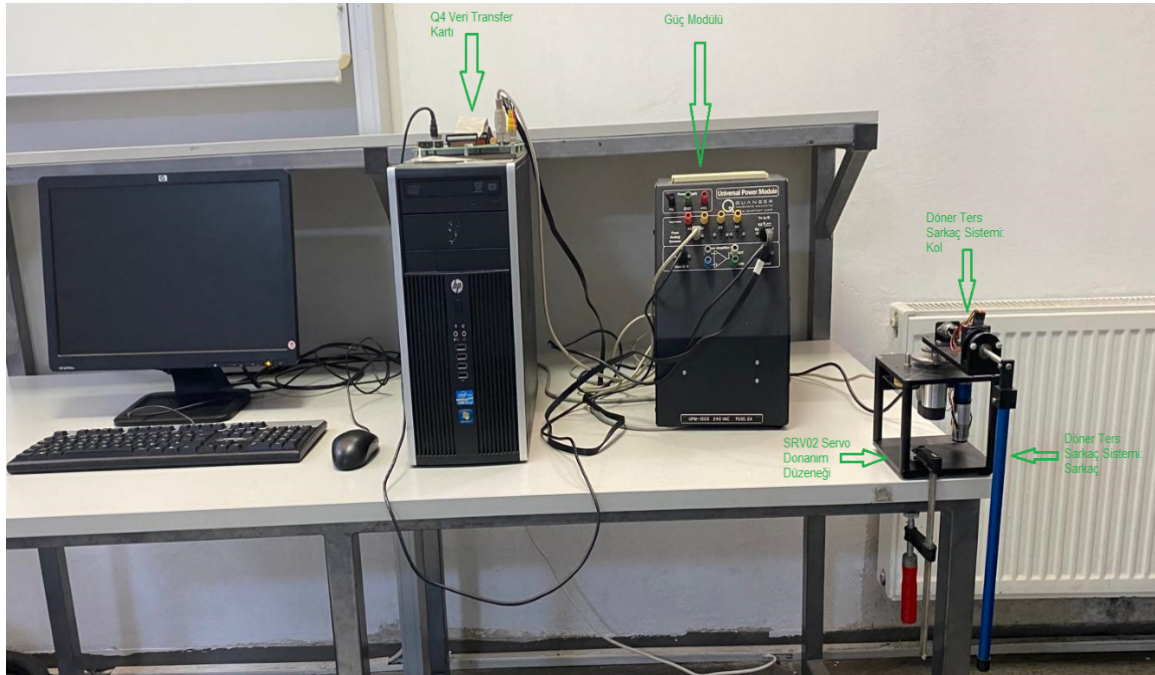
$$a = \frac{64}{T_p^2} x_{3lim}. \quad (56)$$

(56) denklemi sağlanırsa, sarkaç doğrusal bölgede olsa dahi hareket yönü değişmeden kolun konumu  $x_{3lim}$  değerine ulaşamayacaktır. Bu koşul, kol için sınır değerinin geçilmeyeceğini garanti etmektedir. Böylece kol sınır değerini aşmadan sarkaç enerjisinin yükseltme işlemi yapılmaktadır.

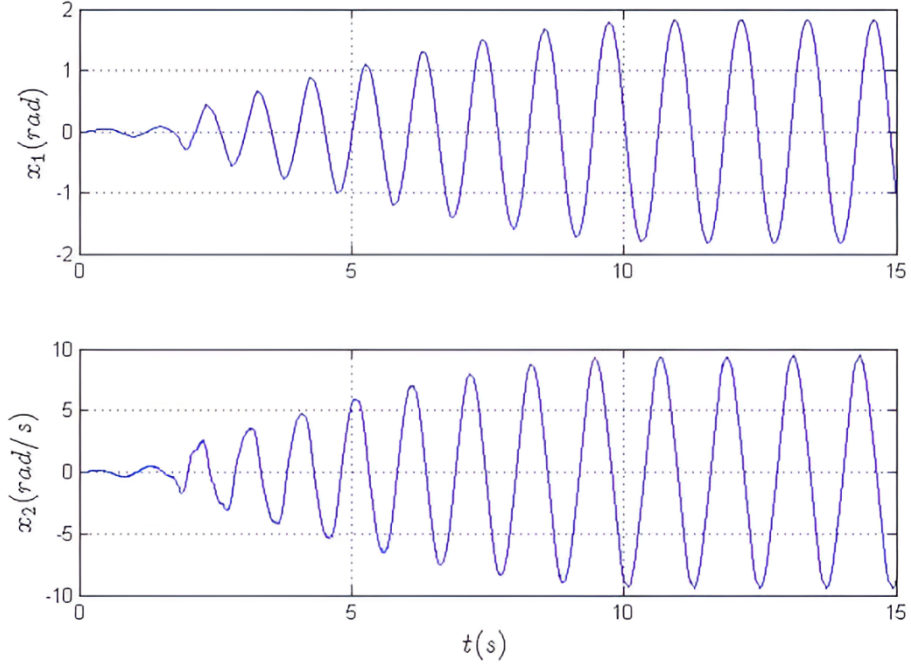
Bu koşullar neticesinde, sarkaç alt yarı düzlemdeyken ( $\cos(x_1) > 0$ ) ve sarkaç kararlı denge noktasını geçtiğinde yani  $\sin(x_1)$  işaret değiştirdiğinde kol sabit ivmelendirilip,  $\cos(x_1)$  veya  $\dot{x}_1$  işaret değiştirdiğinde kol ters yönde ivmelendirilirse, kolun harekete başladığı andaki sarkaç enerjisi, kolun durduğu andaki enerjisinden az olacaktır.

#### 4. Deneysel Sonuçları

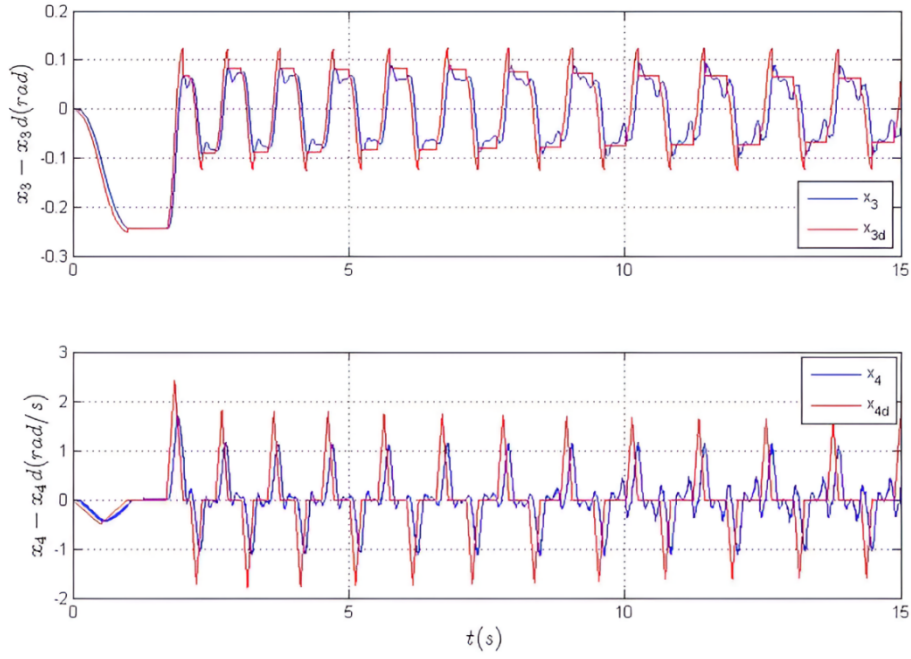
Bu bölümde döner ters sarkaç için doğrusal olmayan geri beslemeli kontrol ile önerilen enerji tabanlı havaya yükseltme işleminin başarısının test edilmesi için çeşitli deneysel çalışmalar Quanser ROTPEN (SRV02 Servo Base Unit with ROTPEN) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Quanser ROTPEN laboratuvar düzeneyi, dişli bir yapı ile DC Servo motordan oluşan döner servo ana ünitesi, Q4 DAQ veri transfer kartı, güç modülünden oluşmaktadır. Döner servo ana ünitesi, sert alüminyum iskelet üzerine tutturulmuş yüksek kalitede DC Servo motor ve harici dişlileri 14:1 oranında bir dişli kutusu yardımıyla sürmektedir. Ünite, bir optik enkoder ile çıkış mili pozisyonunu ve çıkış açısını ölçmede bir potansiyometre ve motorun hızını ölçmek için bir takometre ile donatılmıştır. Motor şaftı 1024 sayımlı bir dörtleyici enkoder ile çıkış miline bağlı dişli de bir potansiyometre ile birleştirilmiştir. Motor maksimum sürekli akımı ve maksimum hızı sırasıyla 1 A ve 6000 rpm şeklindedir. Q4 DAQ veri transfer kartı, 14 bit analog girişi, 12 bit D/A gerilim çıkışı, dört adet enkoder girişi, programlanabilir dijital giriş ve çıkışları olan bir donanım kartıdır. Güç Modülü regüleli çift  $\pm 12$  VDC çıkışlı güç kaynağı ve lineer güç operasyonel kuvvetlendiricisinden oluşmaktadır. Güç kaynağının  $\pm 12$  VDC için 1 A çıkışı vardır. Maksimum güç çıkışı 45 W, maksimum akım çıkışı 3 A, maksimum gerilim çıkışı 15 V'tur. Şekil 3 bu çalışmada önerilen algoritmanın deneysel testleri için kullanılan döner ters sarkaç sistemini ve diğer bahsedilen donanımları göstermektedir. Tüm deney çalışmalarında denklem (44)'teki kazanç  $k = 1$  olarak atanmıştır.



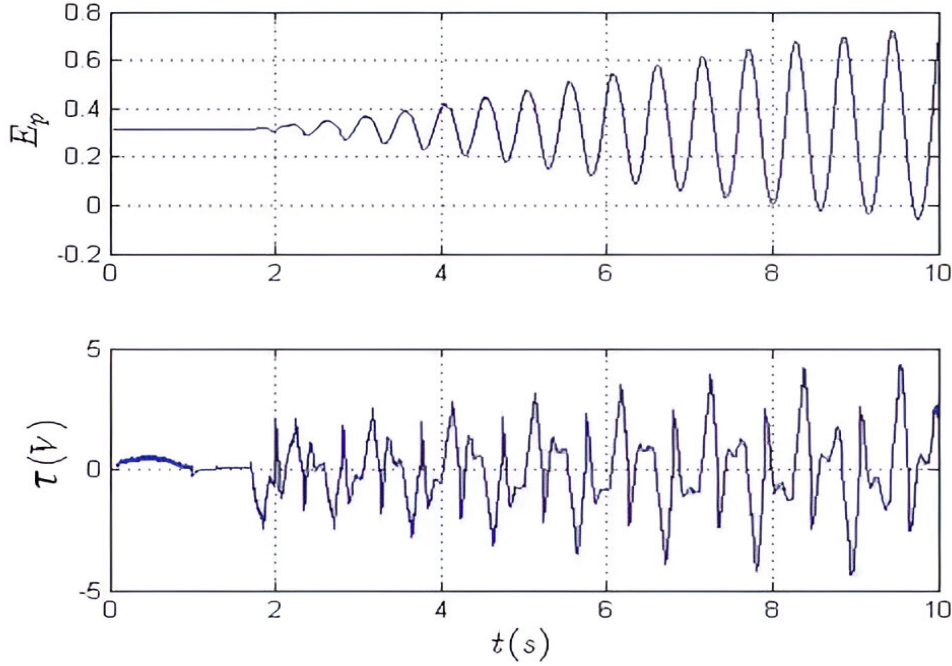
Şekil 3. Deneysel testlerde kullanılan döner ters sarkaç sistemi ve diğer donanımlar.



Şekil 4. Sarkaç açısının ve hızının değişimi. ( $a = \pm 16 \text{ rad/s}^2$ ).



Şekil 5. Kol açısının gerçek ve istenilen değerinin değişimi ve kol hızının gerçek ve istenilen değerinin değişimi. ( $a = \pm 16 \text{ rad/s}^2$ ).

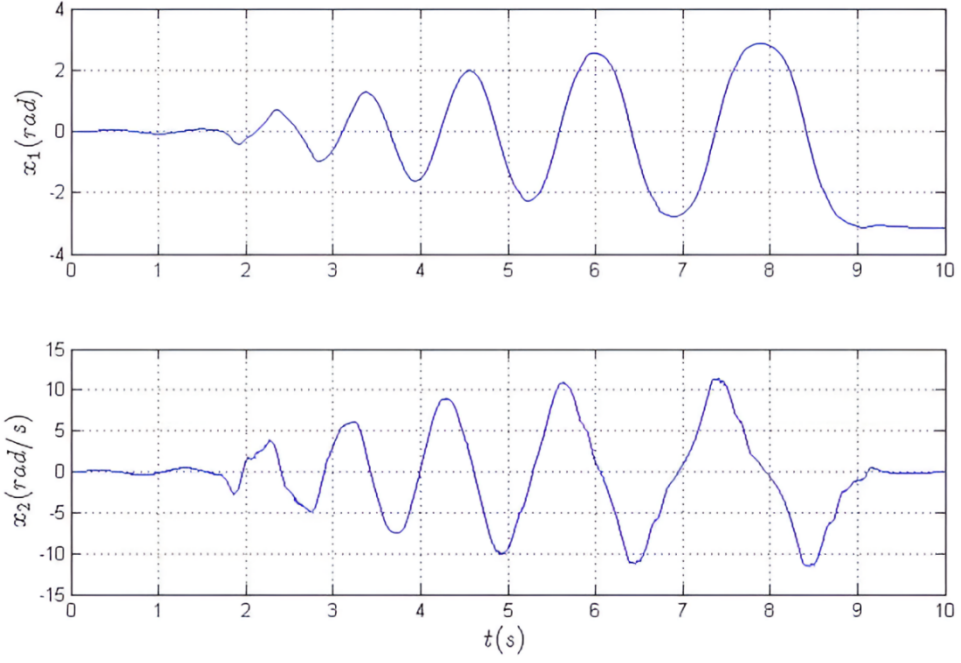


**Şekil 6.** Sarkaca ait enerji seviyesinin her salınımdaki değişimi ve kontrol sinyali ( $a = \pm 16 \text{ rad/s}^2$ ).

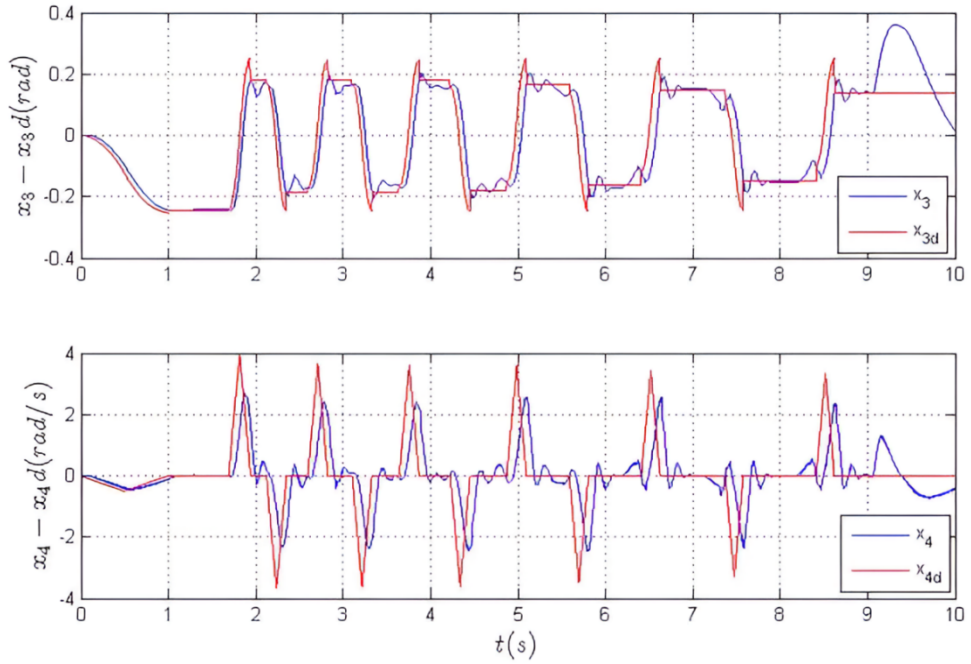
Deney sonuçları bölümünde denklem (56)'ya göre sabit ivme değerleri sırasıyla  $a = \pm 16 \text{ rad/s}^2$ ,  $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$  ve  $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$  değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kararlı denge noktası sıfır, kararsız denge noktası ise  $\pi$  açısal değeridir. Ayrıca, motor kol kontrolü denklem (39)'daki gibi bir kontrol yapısı ve üzerine basit bir PD kontrolcü ile sağlanmaktadır. Burada oransal kazanç 2500 ve türev kazancı 30 olarak atanmıştır. Ayrıca döner sarkaç sistemi kol limit değeri  $\pm 30$  derece ( $\pm 0,523 \text{ rad}$ ) olarak ayarlanmıştır.

Döner ters sarkacı Şekil 4'te sabit ivme  $a = \pm 16 \text{ rad/s}^2$  değeri için sarkaç kararlı denge noktası sıfır açısal değerinden başlatılmıştır. Sarkaç salınımı ile sarkacın kararsız denge noktası  $\pi$  (3,14) açısal değerinden geçmesi beklenmektedir. Şekil 5'te de sarkaç kol açısının gerçek ve istenilen değerinin değişimi ve kol hızının gerçek ve istenilen değeri gösterilmektedir. Bu sonuçlardan istenilen sabit hızın elde edilmediği görülmektedir. Aynı zamanda sarkacın ivme değerinin küçük kalması ile sarkacın enerjisinin yeteri kadar artmadığı Şekil 6'da görülmektedir. Daha fazla enerji yüklemesinin olamaması nedeniyle döner ters sarkacın belli bir sinüzoidal sinyale oturduğu Şekil 4'te görülmektedir. Sarkaç kararsız denge noktasına enerjinin artırılması ile çıkarıldığı anda, tam durum geri besleme (full state feedback) kontrol yöntemi devreye girmektedir. Tam durum geri besleme kontrolcü kazancı MATLAB/LQR kodu ile hesaplanan tam durum geri beslemeli kontrol sarkaç yükseltmesi yapılamadığı için devreye girmemiştir.

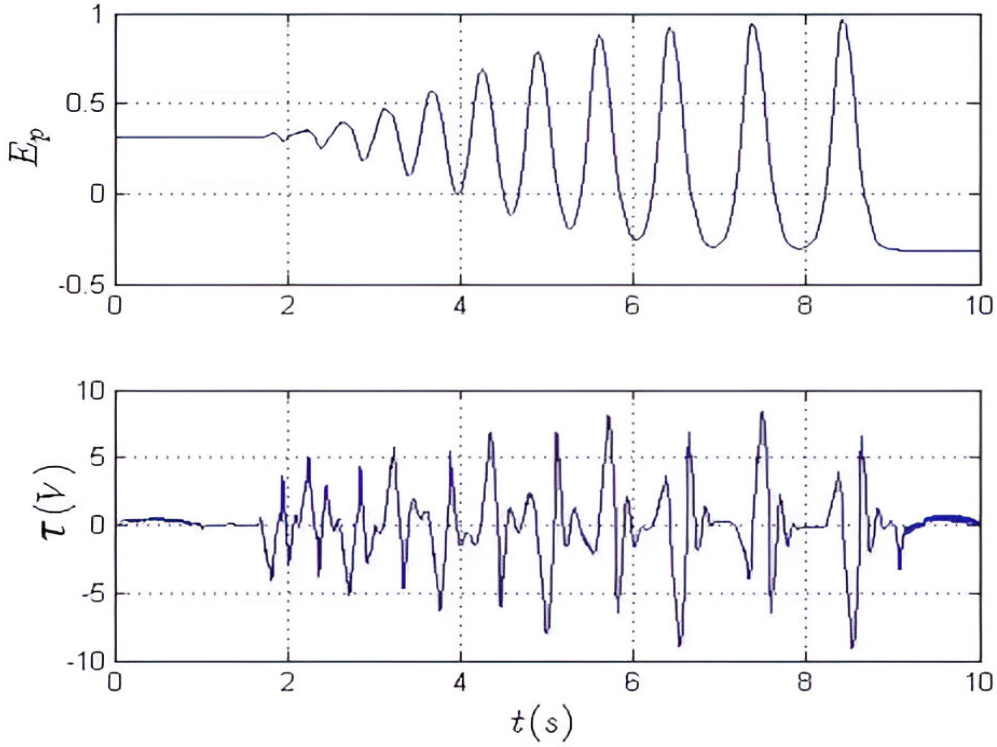
Döner ters sarkacı Şekil 7'de sabit ivme  $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$  değeri için sarkaç kararlı denge noktası sıfır açısal değerinden başlatılmaktadır. Ters sarkacın salınımı ile sarkacın kararsız denge noktası  $\pi$  (3,14) açısal değerine ulaşması hedeflenmektedir. Bu salınım boyunca enerji Şekil 9'da görüldüğü üzere düzenli olarak artmıştır. Sarkaç, kararsız denge noktasına kabul edilen pozitif yönde değil, negatif yönden gelmesi nedeniyle  $-\pi$  (-3,14) açısal değerinde dengede tutulmuştur. Yaklaşık 9 saniyeden sonra sarkaç kararsız denge noktasından geçecek enerjiye sahip olmaktadır. Kararsız denge noktasında tam durum geri besleme kontrol yapısının devreye girmesiyle Şekil 8'de görüldüğü üzere  $x_3$  kol konumu ve  $x_4$  kol hızı, istenilen  $x_{3d}$  kol konumunu ve istenilen  $x_{4d}$  kol hızını takip etmeyi bırakmıştır. Sarkacın kararsız denge noktasında artık tam durum geri besleme kontrolcüsü tarafından kontrol edilmekte olması bunun sebebidir. Sarkacın kararsız denge noktasından geçilmesi algoritmanın başarılı olduğu anlamına gelmektedir. Bunun yanında kontrol girişi maksimum 8V değerine kadar çıkmaktadır. Hesaplanan kontrol sinyali doğrudan sistem uygulanabilmektedir, kontrolcü doygunluk durumu yoktur.



Şekil 7. Sarkaç açısının ve hızının değişimi. ( $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$ ).



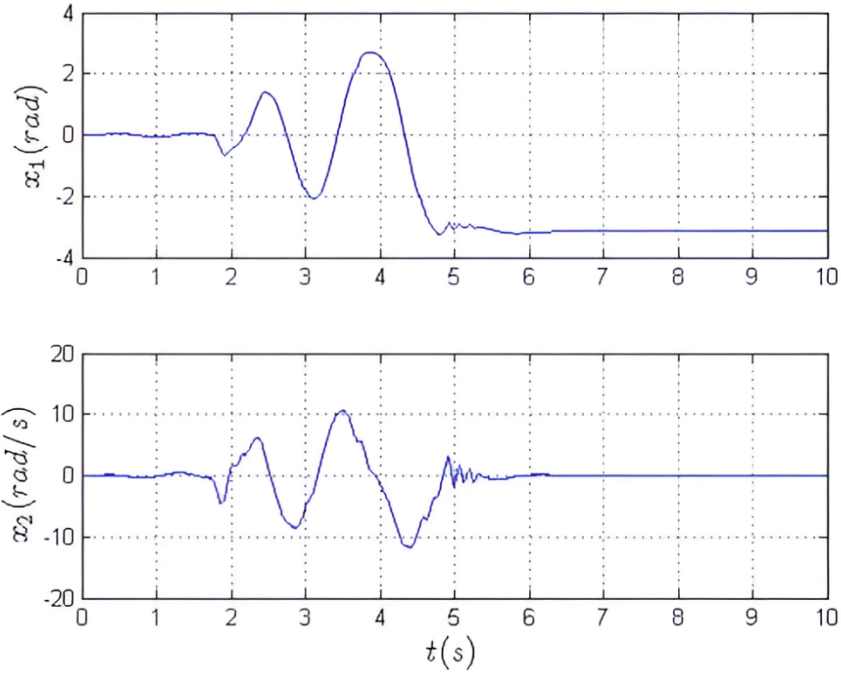
Şekil 8. Kol açısının gerçek ve istenilen değerinin değişimi ve kol hızının gerçek ve istenilen değerinin değişimi. ( $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$ ).



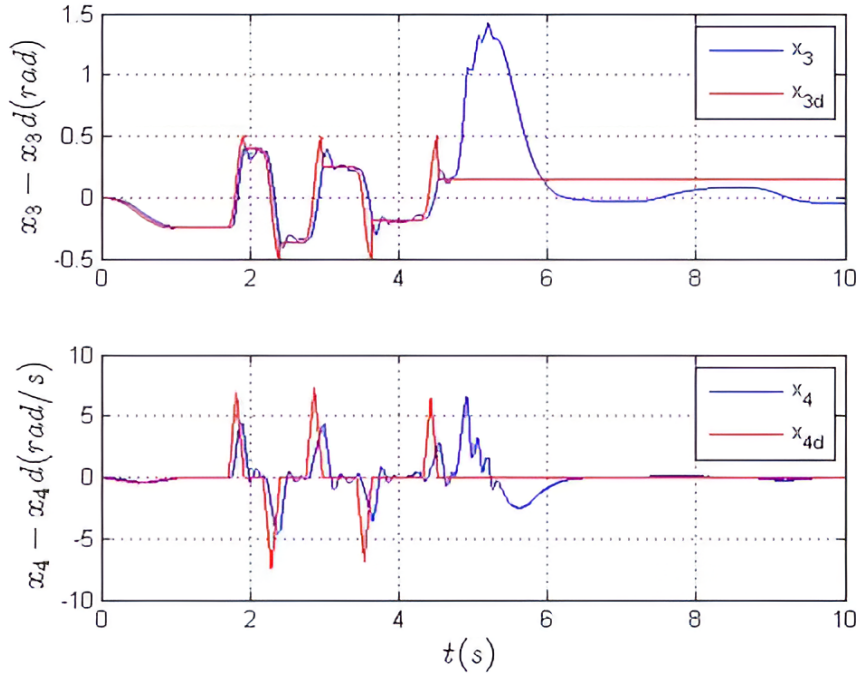
**Şekil 9.** Sarkaca ait enerji seviyesinin her salınımdaki değişimi ve kontrol sinyali ( $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$ ).

Son deneysel çalışmada, döner ters sarkaç Şekil 10'da gösterildiği üzere sabit ivme  $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$  değeri için sarkaç kararlı denge noktası sıfır açısal değerinden başlatılmaktadır. Sarkaç salınımı ile sarkacın kararsız denge noktası  $\pi$  (3,14) açısal değerinden geçmesi önerilen algoritmanın başarısını daha yüksek bir ivme değeri için gösterecektir. Sarkaç salınım boyunca enerji Şekil 12'de görüldüğü üzere düzenli olarak artmaktadır. Bir önceki deney çalışmasında olduğu gibi sarkaç, kararsız denge noktasına negatif yönden gelmesi sebebiyle  $-\pi$  (-3,14) açısal değerinde dengede kalmaktadır. Tam durum geri beslemeli kontrol yapısının devreye girmesine kadar olan sürede tüm durumlar için referans yörüngeler başarı ile takip edilmektedir. Kararsız denge noktasında tam durum geri besleme kontrol yönteminin devreye alınmasıyla Şekil 11'de görüldüğü üzere  $x_3$  kol konumu ve  $x_4$  kol hızı, istenilen  $x_{3d}$  kol konumunu ve istenilen  $x_{4d}$  kol hızını takip etmemektedir. Böylece, sabit ivme  $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$  değeri için önerilen yukarı yükseltme problemi çözülmektedir. Ayrıca, yüksek kol ivmesi nedeniyle kontrol sinyalinde sisteme yüklenmeyecek seviyelerde kontrol sinyalleri üretilmektedir (Şekil 12'de 4-6 saniyeler arası bakınız.) Sisteme 15V maksimum kontrol sinyali uygulanabildiğinden burada sisteme uygulanan kontrol sinyali doygunluğa uğramaktadır. Kontrol tarafından üretilen işaret çizdirildiği için bunu Şekil 12'de görememekteyiz. Ancak, bu aralıkta enerjinin anlık hızlı değişmemesinden kontrol işaretinin doygunluğa uğradığını anlamaktayız.

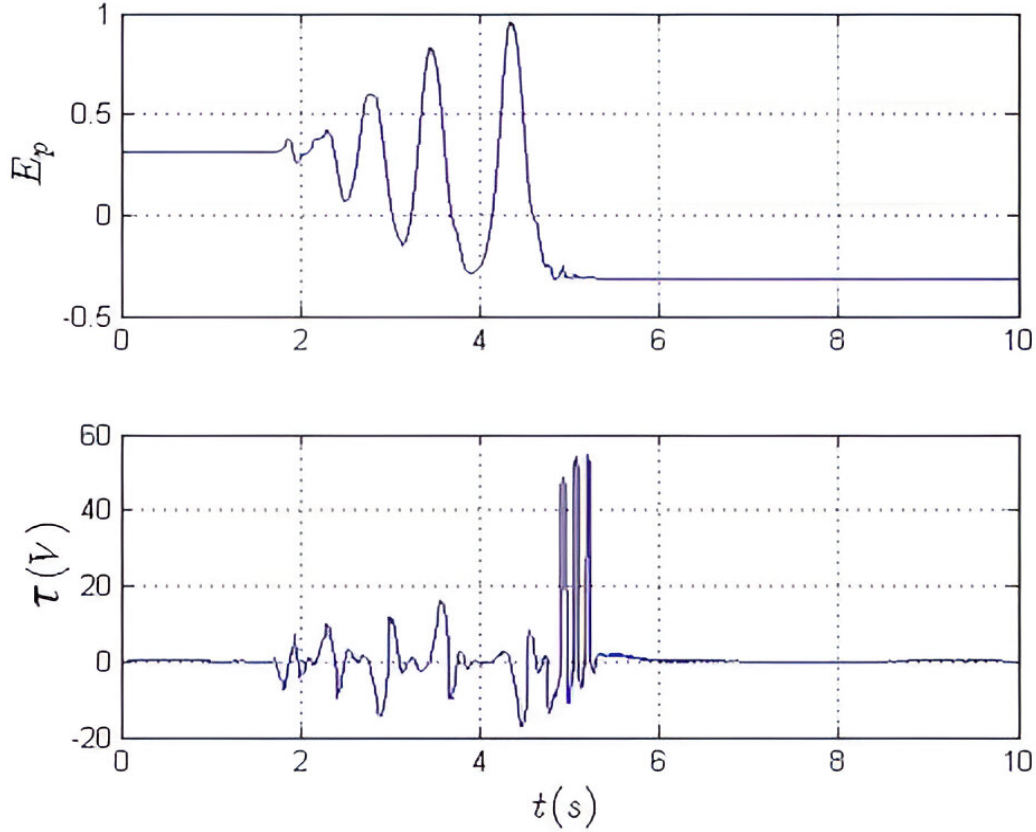
Önerilen kontrol yapısında kol açısı üzerine bir kısıt konulmuştur ve bu kısıt üzerinden tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'ten, Şekil 8'den ve Şekil 11'den görüleceği üzere sistem kolu limit değerini aşmamaktadır. Ayrıca, sarkaç ivmelenmesi  $a = \pm 32 \text{ rad/s}^2$  değerinden  $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$  değerine çıkartılması, döner ters sarkacın kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına çıkma süresini doğrudan etkilemektedir ve hedef ulaşma zamanının yaklaşık olarak 9 s'den 5 s'ye düştüğü gözlenmektedir. Bu sonuçlar neticesinde önerilen yukarı yükseltme algoritması deneysel olarak test edilmiştir ve teorik analizler ışığında başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 10. Sarkaç açısının ve hızının değişimi. ( $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$ ).



Şekil 11. Kol açısının gerçek ve istenilen değerinin değişimi ve kol hızının gerçek ve istenilen değerinin değişimi. ( $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$ ).



Şekil 12. Sarkaca ait enerji seviyesinin her salınımdaki değişimi ve kontrol sinyali ( $a = \pm 64 \text{ rad/s}^2$ ).

Tablo 2. Deneysel sonuçların karşılaştırılması.

	İvme Değeri	Hedef Başarısı ve Süresi	Maksimum Ulaşılan Kol Limit Değeri	Kontrol Sinyalinin Doğunluk Süresi
<b>Deney #1</b>	$\pm 16 \text{ rad/s}^2$	---	0,24 rad	---
<b>Deney #2</b>	$\pm 32 \text{ rad/s}^2$	Var, 9 s	0,2 rad	---
<b>Deney #3</b>	$\pm 64 \text{ rad/s}^2$	Var, 5 s	0,5 rad	0,3 s

Deneysel sonuçların bir özeti olarak Tablo 2’de deneylerde test edilen ivme değerleri, sarkacın yükselmesinin başarısı ve başarı süresi, maksimum ulaşılan kol limiti değeri ve varsa kontrol sinyalinin doğunluk süresi tablo olarak verilmektedir. Tablo 2’deki değerler yaklaşık olarak belirlenmiştir. Burada tekrar belirtmek gereklidir ki ilk deney sarkacın yükselmesi için yetersiz kalmıştır. İkinci deney başarı ile sarkacın yükselmesini sağlamış ve kontrol sinyalinin doğunluğu görülmemiştir. Son deneyde ise başarılı sonuçların yanında sarkaç yükselme süresi azalmış ancak kontrol sinyali kısa bir süre için doğunluğa uğramıştır. Ayrıca belirtmek gereklidir ki kolun gidebildiği maksimum değer tasarımlarda atanan değerden (0,523 rad) aşağıda kalmıştır ve bu sonuç teorik tasarımları ve analizleri desteklemektedir.



## 5. Sonuç

Eksik tahrikli döner ters sarkaç sisteminin enerji tabanlı yükseltmesi konulu bu çalışmada, sarkacı kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına çıkararak bir algoritma sunulmaktadır. Algoritmanın testi, gerçek zamanlı sistem üzerinde deneysel uygulamalar ile gerçekleştirilmiştir. Kontrol algoritması gerçek sistem üzerinde uygulanmıştır ve deney çalışmaları önerilen algoritmanın sistem hedeflerine uygunluğu gösteren sonuçlar ile desteklenmiştir. İkinci deneysel çalışmada düşünülen kol ivmesi, üçüncü deneysel çalışmada iki katına çıkarılmıştır ve sarkaç yükselme zamanında %55 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, kol açısı 0,2 rad değerinden 0,5 rad değerine kadar çıkmıştır. Ancak önceden belirlenen kol kısıt değerini yani 0,523 rad değerini aşmayacak şekilde kol ivmelenmiştir ve algoritma hedefine ulaşmıştır. Başarılı bir şekilde sarkacın yukarı yükselmesi sonrasında tam durum geri beslemeli kontrol yapısı sayesinde sarkaç kararsız denge noktasında her iki deneysel çalışmada da kararlı kılınmıştır. Bu çalışmanın üstün yönü, istenilen tasarım kısıtlarına göre ters sarkacın yukarı yükseltme probleminin, sistemin doğrusal olmayan dinamiği göz önünde bulundurularak çözülmesidir. Bu çalışmada ayrıca mekanik sistemlerin nasıl modelleneceği, analizi ve tasarımı ile alakalı teorik bilgiler de mevcuttur. Dahası bu çalışma, kararsız denge noktasında döner ters sarkaç sisteminin denge kontrolü için farklı kontrol yapılarının test edilmesine araştırmacıları teşvik etmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Shah I, Rehman FU. Smooth second order sliding mode control of a class of underactuated mechanical systems. IEEE Access, 2018; 6: 7759-7771.
- [2] Krafes S, Chalh Z, Saka A. A review on the control of second order underactuated mechanical systems. Complexity 2018, 1-17.
- [3] Adıgüzel F, Yalçın Y. Discrete-time backstepping control with nonlinear adaptive disturbance attenuation for the inverted-pendulum system. Trans Inst Meas Control 2021; 43(5): 1068-1076.
- [4] Adıgüzel F, Yalçın Y. Backstepping control for a class of underactuated nonlinear mechanical systems with a novel coordinate transformation in the discrete-time setting. Proc Inst Mech Eng, Part I: J Syst Control Eng 2022; 236(6): 1211-1223.
- [5] Zhong W, Rock H. Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01); 07 September 2001; Mexico City, Mexico. New York, NY, USA: IEEE. pp. 896-901.
- [6] Krishen J, Becerra VM. Efficient Fuzzy Control of a Rotary Inverted Pendulum Based on LQR Mapping, In: IEEE International Symposium on Intelligent Control; 04-06 October 2006; Munich, Germany. New York, NY, USA: IEEE. pp. 2701-2706.
- [7] Craig K, Awatar S. Inverted Pendulum Systems: Rotary And Arm-Driven A Mechatronic System Design Case Study, Mechatronics 2001; 12: 357-370.
- [8] Acosta JA. Furuta's Pendulum: A conservative nonlinear model for theory and practise. Math Probl Eng 2010; 742894.
- [9] Jain A, Sharma A, Jatelly V, Azzopardi B, Choudhury S. Real-time swing-up control of non-linear inverted pendulum using Lyapunov based optimized fuzzy logic control. IEEE Access 2021; 9: 50715-50726.
- [10] Antonio-Cruz M, Hernandez-Guzman VM, Merlo-Zapata CA, Marquez-Sanchez C. Nonlinear control with friction compensation to swing-up a Furuta pendulum. ISA Trans 2023; 139: 713-723.
- [11] Docekal T, Ozana S, Pal Singh A, Kawala-Sterniuk A. Closed-loop swing-up and stabilization of inverted pendulum by finite-horizon LQR applied in 2-DOF concept. Control and Cybern 2020; 49: 109-122.
- [12] Yang X, Zheng X. Swing-up and stabilization control design for an underactuated rotary inverted pendulum system: Theory and experiments. IEEE Trans Ind Electron 2018; 65(9): 7229-7238.
- [13] Dwivedi P, Pandey S, Junghare AS. Stabilization of unstable equilibrium point of rotary inverted pendulum using fractional controller. J Franklin Inst 2017; 354(17): 7732-7766.
- [14] Türker T, Görgün H, Cansever G. Lyapunov's direct method for stabilization of the Furuta pendulum. Turk J Electr Eng. Comput Sci 2012; 20(1): 99-110.
- [15] Solis MA, Olivares M, Allende H. A switched control strategy for swing-up and state regulation for the rotary inverted pendulum. Stud Inform Control 2019; 28(1): 45-54.
- [16] Melba MP, Marimuthu NS. Minimum time swing up and stabilization of rotary inverted pendulum using pulse step control. Iran J Fuzzy Syst 2009; 6(3): 1-15.
- [17] Abdullah M, Amin AA, Iqbal S, Mahmood-ul-Hasan K. Swing up and stabilization control of rotary inverted pendulum based on energy balance, fuzzy logic, and LQR controllers. Meas Control 2021; 54(9-10): 1356-1370.
- [18] Gupta N, Dewan L. Trajectory tracking and balancing control of rotary inverted pendulum system using quasi-sliding mode control. Mechatron Syst Control 2022; 50(1): 201-231.
- [19] de Carvalho Junior A, Angelico BA, Justo JF, de Oliveira AM, da Silva Filho JI. Model reference control by recurrent neural network built with paraconsistent neurons for trajectory tracking of a rotary inverted pendulum. Appl Soft Comput 2023; 133: 109927.
- [20] Zeghlache S, Ghellab MZ, Djerioui A, Bouderah B, Benkhoris MF. Adaptive fuzzy fast terminal sliding mode control for inverted pendulum-cart system with actuator faults. Math Comput Simul 2023; 210: 207-234.

- [21] Åström KJ, Furuta K. Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica* 2000; 36(2): 287-295.
- [22] Freidovich L, Shiriaev A, Gordillo F, Gómez-Estern F, Aracil J. Partial-energy-shaping control for orbital stabilization of high frequency oscillations of the Furuta pendulum. In: 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control; 12-14 December 2007; New Orleans, LA, USA. New York, NY, USA: IEEE. pp. 4637-4642.
- [23] Gordillo F, Acosta JA, Aracil J. A new swing-up law for the Furuta pendulum, *Int J Control* 2003; 76: 836-844.
- [24] Tanaka S, Xin X, Yamasaki T. New results of energy-based swing-up control for rotational pendulum. *IFAC Proceedings Volumes* 2011; 44(1): 10673-10678.
- [25] Zhang Z, Suh CS. Underactuated Mechanical Systems- A Review of Control Design. *Journal of Vibration Testing and System Dynamics* 2022; 6(01): 21-51.
- [26] Hazem ZB, Bingül Z. Comprehensive review of different pendulum structures in engineering applications. *IEEE Access* 2023; 11: 42862-42880.
- [27] Hamza MF, Yap HJ, Choudhury IA, Isa AI, Zimit AY, Kumbasar T. Current development on using Rotary Inverted Pendulum as a benchmark for testing linear and nonlinear control algorithms. *Mech Syst Signal Process* 2019; 116: 347-369.
- [28] Nguyen NP, Oh H, Kim Y, Moon J. A nonlinear hybrid controller for swinging-up and stabilizing the rotary inverted pendulum. *Nonlinear Dyn* 2021; 104: 1117-1137.
- [29] Nguyen NP, Oh H, Kim Y, Moon J, Yang J, Chen WH. Fuzzy-based super-twisting sliding mode stabilization control for under-actuated rotary inverted pendulum systems. *IEEE Access* 2020; 8: 185079-185092.
- [30] Huang J, Zhang T, Fan Y, Sun JQ. Control of rotary inverted pendulum using model-free backstepping technique. *IEEE Access* 2019; 7: 96965-96973.
- [31] Mofid O, Alattas KA, Mobayen S, Vu MT, Bouteraa Y. Adaptive finite-time command-filtered backstepping sliding mode control for stabilization of a disturbed rotary-inverted-pendulum with experimental validation. *J Vib Control* 2023; 29(5-6): 1431-1446.
- [32] Fantoni I, Lozano R. *Non-linear control for underactuated mechanical systems*. 1st ed. London, UK: Springer Science & Business Media, 2002.
- [33] Moreno-Valenzuela J, Aguilar-Avelar C. *Motion control of underactuated mechanical systems*. 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.



## Hummers ve Askorbik Asit ile Kimyasal İndirgenme Metotlarında Döngüsel Yaklaşım

Esra YILMAZ MERTSOY<sup>1</sup>, Enes BEKTAŞ<sup>2</sup>, Mohammad Ruhul Amin BHUIYAN<sup>3</sup>,  
Haluk KORUCU<sup>4\*</sup>

<sup>1,4</sup> Kimya Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye

<sup>3</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İslamic Üniversitesi, Kushtia, Bangladeş

<sup>1</sup> esrayilmaz@karatekin.edu.tr, <sup>2</sup> enesbektas@karatekin.edu.tr, <sup>3</sup> mrab\_eee@iu.ac.bd, <sup>4\*</sup> halukkorucu@karatekin.edu.tr

(Geliş/Received: 21/11/2023;

Kabul/Accepted: 03/09/2024)

**Öz:** Grafitten, Hummers metodu ile sentezlenen grafen oksidin ve sonrasında grafen oksitten kimyasal indirgenme metodu ile sentezlenen indirgenmiş grafen oksidin, pek çok kullanım alanlarına sahiptir. Bu çalışmada döngüsel yaklaşım ile grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit sentezlenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef ile grafitten, Hummers yöntemi ile grafen oksit ve ardından kimyasal indirgenme metodunda askorbik asit kullanılarak indirgenmiş grafen oksit sentezlenerek birinci döngü tamamlanacaktır. Birinci döngüden sentezlenen indirgenmiş grafen oksit ikinci döngüde grafit yerine Hummers yönteminde kullanılarak döngüsel yaklaşım hedeflenmiştir. Döngü prosesi ile dört farklı grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örnekleri elde edilmiştir. Sentezlenen her bir döngüye ait grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerinde, FTIR, RAMAN, BET, ZETA-SİZER ve SEM-EDS analizleri ile döngüsel yaklaşımda grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Döngüsel yaklaşım ile grafen oksit örneklerinde oksidasyon derecelerinin artması ile yapıdaki kusurlu bölgelerinin arttığı, indirgenmiş grafen oksit örneklerinde ise oksidasyon derecelerinin azalması ile yapıdaki kusurlu bölgelerinin azaldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Grafen oksit, hummers yöntemi, askorbik asit, kimyasal indirgeme, döngü metodu.

### The Cyclical Approach in Chemical Reduction Methods Using Hummers and Ascorbic Acid

**Abstract:** Graphene oxide synthesized from graphite by the Hummers method and then reduced graphene oxide synthesized from graphene oxide by the chemical reduction method have many uses. In this study, the cyclic approach was used to synthesize graphene oxide and reduced graphene oxide. With this goal, the first cycle will be completed by synthesizing graphene oxide from graphite using the Hummers method and then reducing graphene oxide using ascorbic acid in the chemical reduction method. The cyclic approach aimed to use the reduced graphene oxide synthesized from the first cycle in the Hummers method instead of graphite in the second cycle. Four different graphene oxide and reduced graphene oxide samples were obtained by the loop process. Graphene oxide and reduced graphene oxide samples belonging to each synthesized cycle were characterized by FTIR, RAMAN, BET, ZETA-SIZER, and SEM-EDS analyses, and graphene oxide and reduced graphene oxide samples were characterized by a cyclic approach. With the cyclic approach, it was found that the defective regions in the structure increased with the increase of oxidation degrees in graphene oxide samples, and the faulty areas of the structure decreased with the decrease of oxidation degrees in reduced graphene oxide samples.

**Key words:** Graphene oxide, hummers method, ascorbic acid, chemical reduction, cycle method.

#### 1. Giriş

Grafen temelli malzemeler son yıllarda bilim insanlarının büyük ilgi odağı haline gelmiştir. Bunda grafenin yüksek yüzey/hacim oranı, üstün iletkenlik özelliği ve yüksek mekanik dayanım gibi bazı üstün özellikleri etkili olmaktadır [1]. Bu özellikleri sayesinde grafen temelli malzemeler biyosensörler [2], yakıt hücreleri [3] enerji depolama [4], entegre devreler [5], biyomedikal uygulamalar [6] ve ağır metal giderimi ile atık su yönetimi [7,8] gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Grafen oksit (GO), grafitin oksitleyici bir madde varlığında derişik asit içerisine eklenmesi ile elde edilir. Kimyasal oksidasyon yöntemleri arasında Brodie, Staudenmaier, Hummers ve Modifiye Hummers-Tour gibi metotlar yer almaktadır [9]. Hummers ve Offeman grafitin potasyum permanganat ve derişik sülfürik asit ile reaksiyonuna dayanan sentez yöntemi geliştirdiler [10]. Marcano ve arkadaşları çalışmalarında Hummers yönteminde toksik gazlara neden olan sodyum nitrat yerine fosforik asit kullanmıştır [11]. Grafen sentezi için mekanik ve termal eksfoliasyon yöntemi, kimyasal buhar birikim yöntemleri (CVD) [12] elektroliz ve foto kataliz

\* Sorumlu yazar: [halukkorucu@karatekin.edu.tr](mailto:halukkorucu@karatekin.edu.tr) Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5217-5425, <sup>2</sup> 0000-0002-8380-4519 <sup>3</sup> 0000-0001-7335-4158, <sup>4\*</sup> 0000-0001-6763-3249

gibi yöntemler olmakla beraber bu yöntemler maliyet ve üretim kapasitesi açısından düşünüldüğünde sanayi ölçekli üretimler için uygulanabilir değildir. Kimyasal indirgenme yöntemi ile indirgenmiş grafen oksit (rGO) sentezinde ise, maliyet ve sanayi ölçekli prosesler için uygulanabilirlik yönünden düşünüldüğünde, en avantajlı grafene yakın sentez yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır [13]. Literatürde grafen oksidin kimyasal olarak indirgenmesinde hidrazin ve sodyum bor hidrür yaygın olarak kullanılan çalışmalar mevcuttur. Ancak bu kimyasallar toksik etkilere sahip ve sanayi ölçekli kullanım için özel güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir. Bu sebeple GO'nun kimyasal indirgenme metodu ile rGO'ya dönüştürmek için daha çevre dostu özellikte ve toksik etkileri olmayan bir indirgeyici madde arayışına girilmiştir. L-Askorbik asit (L-AA) indirgeme kabiliyetine yüksek ve çevre dostu proses özelliğinden dolayı GO'nun kimyasal olarak indirgenmesinde kullanılarak, rGO sentezinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [13-14].

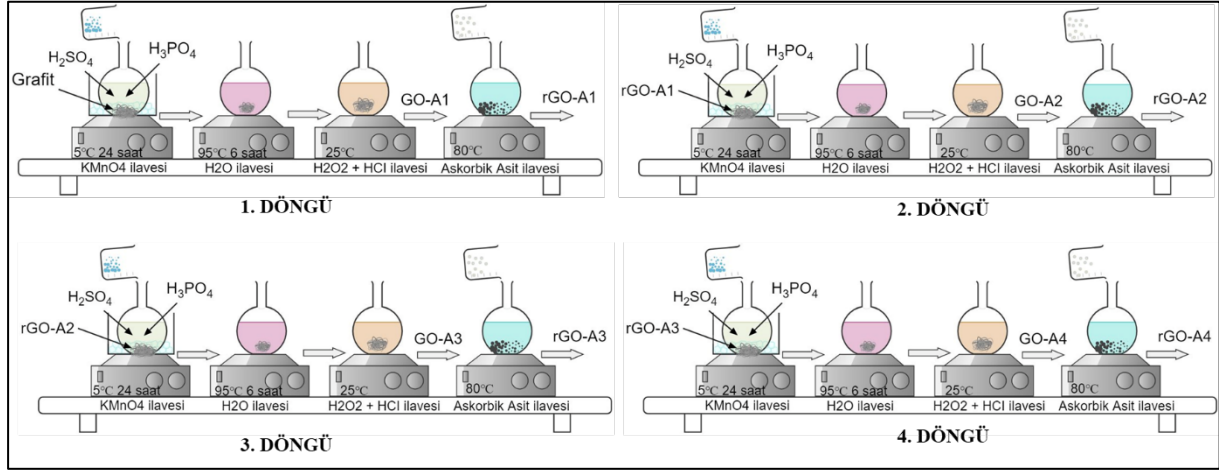
Bu çalışmada, Hummers metodu ile GO sentezi ve kimyasal indirgenme metodunda askorbik asit kullanılarak rGO sentezi üzerindeki döngüsel yaklaşımın etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Döngüsel yaklaşımda GO ve rGO örneklerinin döngü içerisinde tekrardan oksidasyon ve kimyasal indirgenme işlemine tabi tutularak sentezlenen döngüsel, GO ve rGO örneklerinde farklılıkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu hedefle FTIR analizi ile yapı karakterizasyonu, Raman analizindeki D piki yoğunluğunun G piki yoğunluğuna oranı (ID/IG), BET yöntemi ile yüzey alanı ölçümü (YA-m<sup>2</sup>/g), ZETA-NANO ile ortalama parçacık boyutu (PB-nm) ve zeta potansiteli (ZP-mv), SEM-EDS analizinden elde edilen verilere göre karbonun oksijene atomik oranı (C/O) incelenerek, döngüsel yaklaşımda GO ile rGO örneklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Döngüsel yaklaşımda, Hummers ve kimyasal indirgenme metodunda ilk sentez birinci döngüler referans alınarak, her iki yöntem için iyileşme oranları belirlenmiştir. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farkı döngüsel yaklaşımın GO ve rGO üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

İyileştirilmiş Hummers Yöntemi ile GO sentezi ve sentezlenen GO'dan kimyasal indirgeme metodu ile rGO sentezi için ortofosforik asit (Merck, >%85), sülfürik asit (Merck, >%99), potasyum permanganat (Sigma, >%99), hidrojen peroksit (Merck, >%30), hidroklorik asit (Sigma, >%37), L-Askorbik asit (Sigma, >%99) gibi analitik saflıkta kimyasalların kullanımı tercih edilmiştir.

### 2.1 Döngü metodu ile Hummers metodu uygulanarak GO ve kimyasal indirgenme metodunda askorbik asit varlığında rGO sentezi

Döngüsel yaklaşım ile amaç, döngüsel yaklaşımın sentezlenen GO ve rGO örnekleri üzerindeki etkileri karakterize etmektir. Bu hedefle döngüsel yaklaşımda, ilk olarak Hummers metodu kullanılarak GO sentezlenmiştir. Bunun için ilk olarak 30 g grafit çift cidarlı cam reaktöre alınmış ardından 300 mL sülfürik asit 30 mL fosforik asit ve son olarak 60 g potasyum permanganat reaksiyon ortamına yavaş yavaş eklenerek 5 °C'de 24 saat boyunca reaksiyon devam etmiştir. Reaksiyon sıcaklığı kademeli olarak önce 35 °C'ye ve sonra 95 °C'ye çıkartılarak üzerine 100 mL saf su ilave edilmiş ve 6 saat daha karıştırılmıştır. Reaksiyonun sonunda %3'lük 100 mL hidrojen peroksit ilave edilerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Metal iyonlarını uzaklaştırmak için %3'lük 100 mL hidroklorik asit çözeltisi ile yıkama işlemi yapılmıştır. Son olarak elde edilen örnek pH 3-4 arasında kadar saf su ile dekantasyon işlemi ile yıkanmış ardından santrifüj işlemi yapılarak 50 °C'de atmosferik etüvde kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonunda yaklaşık 45 g GO sentezlenmiştir. Sentezlenen grafen oksit, GO-A1 olarak isimlendirilmiştir. İndirgenmiş GO sentezi için askorbik asit döngüleri gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen grafen oksit (GO-A1) 20 g alınarak üzerine 150 mL saf su eklenip sıcaklık 80 °C'ye çıkarılmıştır. 80 °C'de iken üzerine 40 g askorbik asit eklenmiştir. Reaksiyon 80 °C'de 24 saat süre deney gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda karışım yıkanmış ve pH 7 ulaşıncaya önce aseton sonra etil alkol ile santrifüj ile yıkama yapılarak vakumlu etüvde kurutulmuştur. Kurutulan rGO örnekleri rGO-A1 olarak kodlanmıştır. Birinci döngüden elde edilen rGO-A1 örneği grafit yerine kullanılarak aynı metot ve karışım oranlarında ikinci döngüye başlanmış ve döngüsel GO sentezi gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen GO, ikinci döngü GO-A2 olarak kodlanmıştır. Sentezlenen ikinci döngü grafen oksit aynı şartlarda indirgenmiş ve bu malzeme ikinci döngü indirgenmiş grafen oksit rGO-A2 olarak kodlanmıştır. Toplamda 4 döngü tekrar edilmiştir ve sentezlenen GO ve rGO örnekleri sırasıyla GO-A3, rGO-A3, GO-A4 ve rGO-A4 olarak isimlendirilmiştir. Gerçekleştirilen dört döngü için, sentezlenen döngüsel, GO ve rGO örneklerinde, yöntemlere ait kimyasal karışım oranları eşit alınmıştır. Şekil 1'de döngü metodu ile sentezlenen GO ve rGO örneklerine ait yaklaşım şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1 Döngü metodu ile GO ve rGO sentezinin şematik gösterimi.

## 2.2. Malzemelerin karakterizasyonu için grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit için belirlenen kalite karakteristikleri

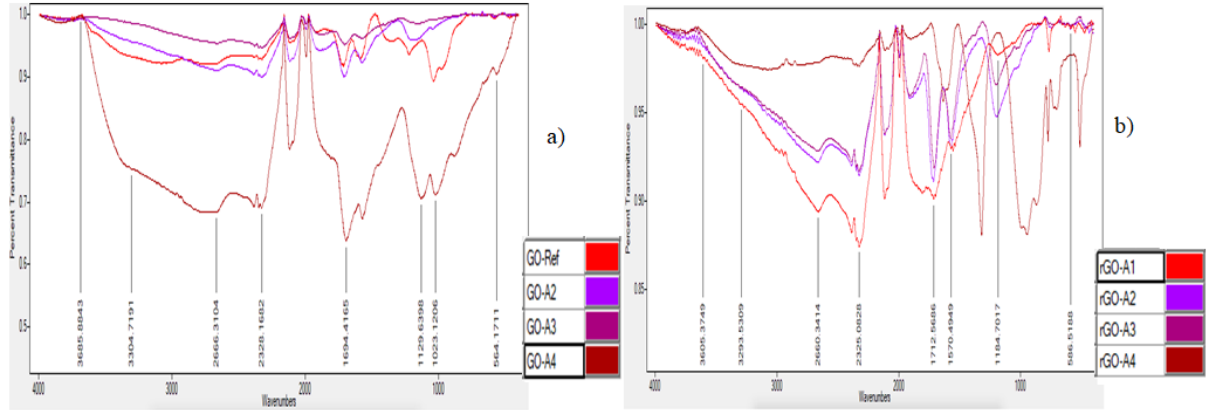
Çalışmada sentezlenen döngüsel grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerin karakterizasyonu için, fonksiyonel grupların belirlenmesi için FTIR-ATR analizleri Bruker Tensör 2 ile cihaza bağlı ATR ünitesi ile 400 – 4000 nm dalga boyları arasında tarama gerçekleştirilmiştir. BET yüzey alanı analizleri Quantachrome Nova LX4 Touch ile sıvı azot ortamında, fiziksel adsorpsiyon yönteminde, BET metoduna göre yüzey alanı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Zeta potansiyeli ve parçacık boyut dağılımı analizleri pH=6,5'ta 0,01 g örnek 100 mL saf su ile dispersiyon edilerek, Malvern Nano-ZS ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizleri Carl Zeiss-Sigma 300 VP ile 1000 kat büyütme ile vakum altında elementel yüzey analizi yapabilen 129 keV EDS dedektör ile gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki tüm analizler Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. RAMAN spektroskopisi Renishaw-In Via Qontor ile 0,5 mW ve 514,5 nm lazer çıkış gücü kullanılarak gerçekleştirildi. Raman analizleri Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit sentezi için belirli kalite karakteristikleri seçilmiş, seçilen bu kriterlerin sonuçları üzerinden optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. İlk kalite kriteri Raman analizindeki  $1350\text{ cm}^{-1}$ 'de  $I_D$  piki ve  $1590\text{ cm}^{-1}$ 'de  $I_G$  piki üzerinedir.  $I_D/I_G$  pikinin oranındaki artış düzensizlikteki artışa dolayısı ile tabaka sayısında azalmaya gösterge kabul edilmektedir. Dolayısı ile grafen oksit sentezi için  $I_D/I_G$  pikinin şiddeti yapıdaki kusurun az olması istendiğinden dolayı düşük olması istenir. İndirgenmiş grafen oksit sentezi için  $I_D/I_G$  oranı tabaka sayısının az olması ve indirgenme şiddetinin fazla olması istendiği için yüksek olması istenir. İkinci kalite kriteri Taramalı Elektron Mikroskopisi – Enerji Dispersif Spectrometry (SEM-EDS) ile belirlenebilen karbonun oksijene atomik oranı (C/O) oksidasyon derecesi açısından seçilmiştir. Grafen oksit için oksidasyon kuvvetli olması istendiği için bu oran düşük olması istenirken, indirgenmiş grafen oksit için indirgenmenin yüksek olması istendiği için bu değer yüksek olması istenir. Üçüncü ve dördüncü kalite kriteri ölçümü Zeta potansiyeli ve Parçacık boyut dağılım ölçümleri ile yapılmıştır. Bu ölçümlerde dispersiyonlarında stabilitenin iyileştirilmesi amacıyla Zeta potansiyeli (mV) küçük değer olması ve sentezlenen örneklerin nano formda olabilmesi için parçacık boyut dağılımlarının küçük olması hedeflenir. Beşinci kalite kriteri olarak BET cihazı ile GO ait yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ölçümü yapılmıştır. GO ve rGO ait yapılan yüzey alanı ölçümü, gözenekli bir yapı hedeflenmesinden dolayı yüksek olması istenir. Tablo 1'de grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit ait incelenen kalite kriterleri ait bilgileri verilmiştir. Döngüsel yaklaşımda Tablo 1'de hedef değerler göz önüne alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Tablo 1.** Grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksite ait kalite kriterleri.

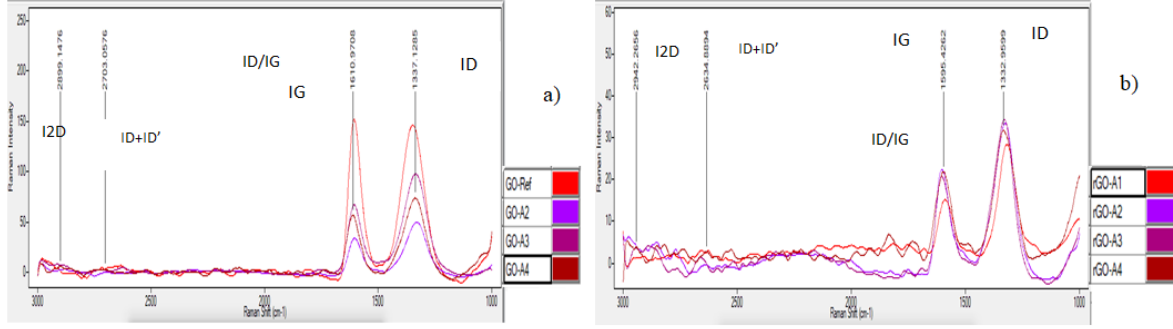
Kalite Kriterleri	Sembol	Açıklama	Bilgi	GO için Hedef	rGO için Hedef
1	$I_D/I_G$	D Pikinin-G Pikinin Şiddetine Oranı	Yapıdaki Kusur	En Büyük En İyi	En Küçük En İyi
2	ZP	Zeta Potansiyeli	Dispersiyon	En Küçük En İyi	En Küçük En İyi
3	PB	Parçacık boyut dağılımı	Nano özelliği	En Küçük En İyi	En Küçük En İyi
4	YA	Yüzey alanı	Gözenek özelliği	En Büyük En İyi	En Büyük En İyi
5	C/O	Karbon-Oksijen Oranı	Oksidasyon Derecesi	En Küçük En İyi	En Büyük En İyi

### 3. Deneysel Sonuçlar

Sentezlenen grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait FTIR-ATR spektroskopisine ait sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de FTIR-ATR analizi deseninde görüldüğü üzere sentezlenen grafen oksit örneklerinde grafitin yapısına ait olmayan C=O titreşim piki  $1721\text{ cm}^{-1}$ ’de O-H gruplarının titreşim ve deformasyon pikleri  $3391\text{ cm}^{-1}$  ve  $1410\text{ cm}^{-1}$ ’de, C-O gerilme titreşim piki  $1221\text{ cm}^{-1}$ , C-O gerilim piki  $1046\text{ cm}^{-1}$ ’de ve C=C gerilim piki  $1680\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$ ’de gözlemlenmiştir [15]. FTIR analiz sonuçları göstermiştir ki, oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı ile döngüsel yaklaşımda grafen oksit sentezinin başarılı olduğuna işaret etmektedir. Şekil 2 incelendiğinde ilk olarak Hummers metodu ile grafitten sentezlenen grafen oksite ait piklerin, döngüsel yaklaşım ile sentezlenen grafen oksit örneklerinde daha baskın olduğu görülmektedir. Buda oksidasyon performansının döngüsel yaklaşım ile sentezlenen grafen oksit örneklerinde daha iyi olduğu söylenebilir. Döngüsel yaklaşım ile kimyasal indirgenme metodu ile indirgenmiş grafen oksit sentezine ait pikler incelendiğinde özellikle 2. döngüden sonra pik şiddetlerinde artış görülmüştür. Buda indirgenme performansının döngüsel yaklaşımda olumsuz etki göstererek, yapıdaki fonksiyonel grupların uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Şekil 3’de sentezlenen grafen oksit örneklerine ait RAMAN taramaları verilmiştir. Grafen oksitlerin başarılı bir şekilde sentezlenebildiklerini göstermekle beraber Grafen oksidin RAMAN deseninde  $1350\text{ cm}^{-1}$ ’de yaklaşık  $I_D$  piki,  $1590\text{ cm}^{-1}$ ’de yaklaşık  $I_G$  piki, göstermektedir. Sentezlenen döngüsel grafen oksitlerin Raman analizi desenlerindeki  $I_G$  pikleri  $1590\text{ cm}^{-1}$ ’den daha büyük dalga boylarına kaymış gözükmektedir. Bu durum sentezlenen grafen oksit örneklerinin çok tabakalı yapıda olduklarına göstermektedir. Grafen oksit örneklerine göre indirgenmiş grafen oksit örneklerinde  $I_D$  ve  $I_G$  piklerinin  $I_D/I_G$  oranında artış gözlenmiştir. Bu indirgenmiş grafen oksit örneklerinin düzensizliğindeki artışa dolayısıyla tabaka sayısında azalmaya işaret etmektedir [16].

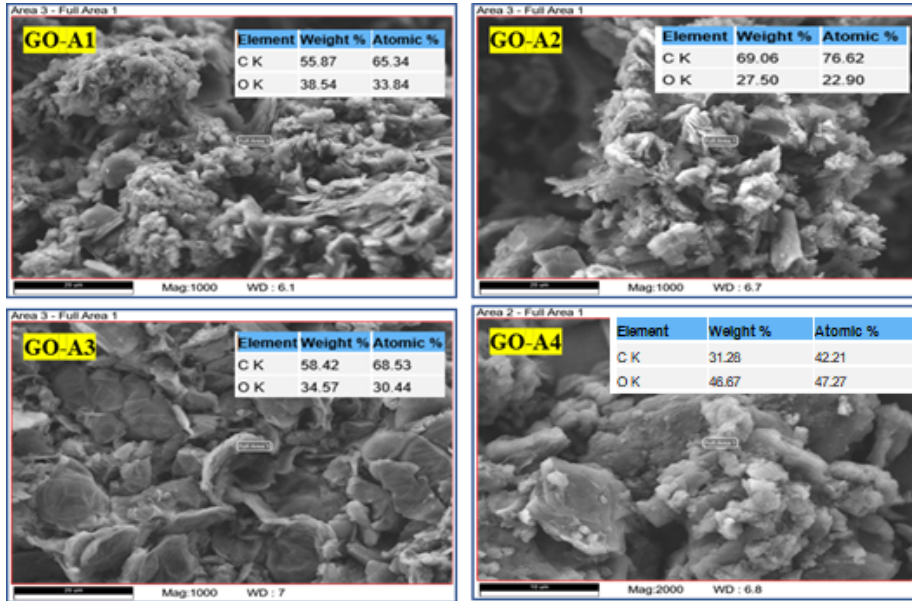


**Şekil 2.** Döngüsel yaklaşım ile sentezlenen a) grafen oksit ve b) indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait FTIR grafikleri.



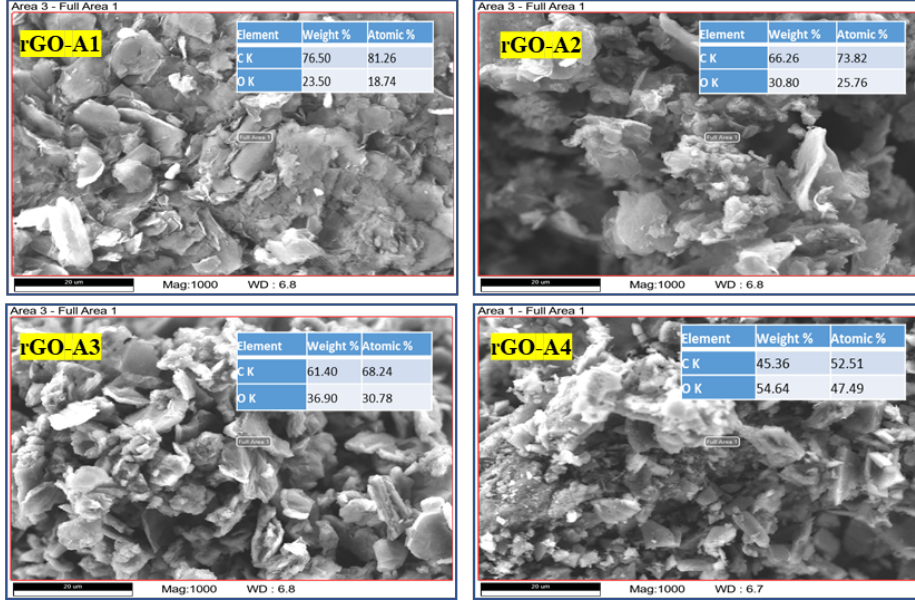
Şekil 3. Sentezlenen a) grafen oksit ve b) indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait Raman grafikleri.

Şekil 4'te sentezlenen grafen oksit örneklerine ait SEM+EDS görüntüleri ve taramaları verilmiştir. SEM görüntüleri düzgün grafit yapısının tabakalar halinde kıvrımların oluştuğunu bu kıvrımların oluşmasının sebebi grafen oksidin oluşumu sırasında ortaya çıkan oksijen içeren fonksiyonel gruplardan ve bunun sonucu oluşan yapısal kusurlardan kaynaklandığı söylenebilir. SEM görüntülerine ilave olarak doğal grafitin ve sentezlenen grafen oksidin EDS spektrumları incelendiğinde yapıdaki kimyasal değişim takip edilebilir. Döngüsel yaklaşım ile grafen oksit sentezinde döngüler sayısı arttıkça C/O oranları düşüş gözlenmiştir. Buda yapıya bağlanan oksijen içerikli fonksiyonel grupların varlığını ve dolayısı ile oksidasyon verimini artırdığını göstermektedir. Şekil 5'te indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait SEM+EDS görüntüleri ve taramaları verilmiştir. İndirgenmiş grafen oksit sentezinde C:O oranının artış, karbonla tek bağ yapan fonksiyonel grupların miktarının azalmasına bağlanabilir. Bu sonuçlar göstermektedir ki C:O oranının artma kimyasal indirgeme metodu ile indirgenmiş grafen oksit sentezinin başarılı olduğunun bir göstergesi kabul edilir [16]. Döngüsel yaklaşımdaki hedefimiz döngüler arasında indirgenmiş grafen oksidin yapısındaki fonksiyonel grupların yapıdan ayrılmasını sağlayarak C/O oranını artırabilmektir. Ancak kullanılan kimyasalların etkisi ve ürünlerdeki safsızlıkların giderilememesi gibi etkiler sebebiyle döngüler arasında indirgeme performansı olumsuz bir şekilde etkilenmiş ve döngü sayısı arttıkça C/O oranlarında beklenen artış gözlenememiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de ZETA Potansiyeli ve Parçacık Boyutu dağılım analizleri sonuçları verilmiştir. Döngüsel yaklaşımdaki grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksite ait olan Zeta potansiyeli sonuçları -36,6 ile -63,8 mV arasında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerinin dispersiyon özelliklerini karşıladığını göstermektedir [17]. Parçacık boyutu sonuçları ise 270,880-694,514 nm arasında elde edilmiştir. Parçacık boyut dağılımı grafikleri detaylı incelediğinde örneklerin nano partiküller içeren yapılar ihtiva ettiği görülmektedir.

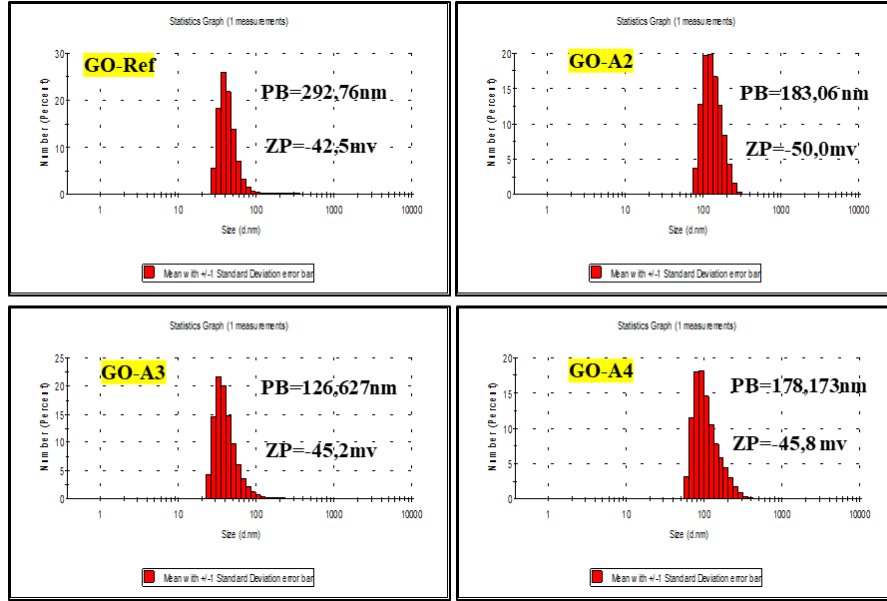


Şekil 4. Grafen oksit örneklerine ait SEM+EDS görüntüleri ve sonuçları.

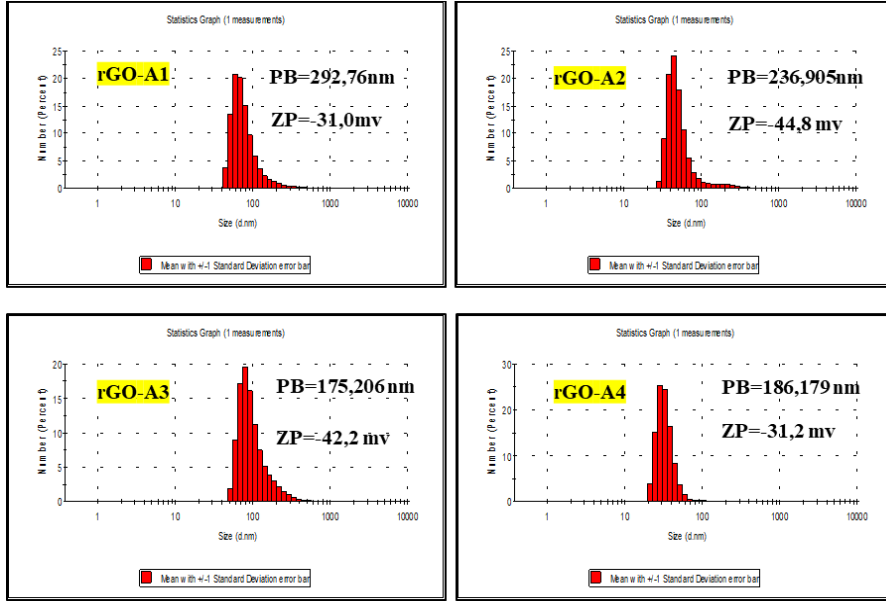




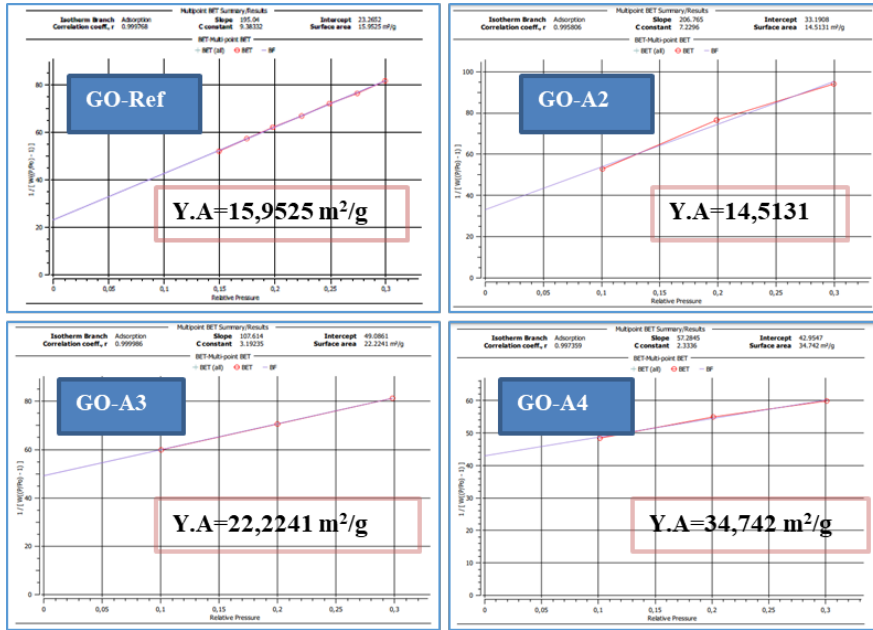
Şekil 5. İndirgenmiş grafen oksit örneklerine ait SEM+EDS görüntüleri ve sonuçları.



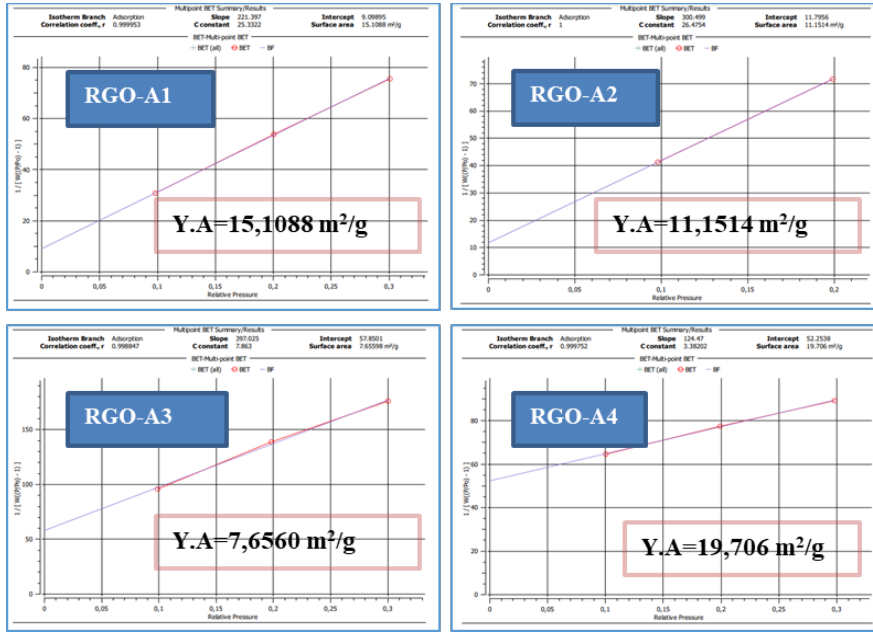
Şekil 6. Grafen oksit örneklerine ait Zeta potansiyeli ve ortalama parçacık boyutu analiz sonuçları.



Şekil 7. İndirgenmiş grafen oksit örneklerine ait Zeta potansiyeli ve ortalama parçacık boyutu analiz sonuçları.



Şekil 8. Döngüsel yaklaşım ile askorbik asit kullanılarak sentezlenen grafen oksit örneklerine ait BET yüzey alanı sonuçları.



Şekil 9. Döngüsel yaklaşım ile askorbik asit kullanılarak sentezlenen indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait BET yüzey alanı sonuçları.

Şekil 8’de Hummers yöntemi ile döngüsel grafen oksit sentezine ait BET yüzey alanı sonuçları verilmiştir. Hummers yöntemi ile döngüsel grafen oksit sentezi yaklaşımında bet yüzey alanı ölçümlerinde döngü sayısı arttıkça yüzey alanı değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Şekil 9’da askorbik asit döngüsünden sentezlenen indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait BET yüzey alanı sonuçları verilmiştir. Döngüsel indirgenmiş grafen oksit sentezi yaklaşımında bet yüzey alanı ölçümlerinde döngü sayısı arttıkça yüzey alanı değerlerinde bir düşüş gözlenmiştir. Döngüsel yaklaşımında indirgenme veriminin düşük olması sebebiyle yüzey alanı değerlerinde beklenen artış gözlemlenmemiştir.

Tablo 2’de sentezlenen grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait kalite kriterlerine ait elde edilen sayısal sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2. Döngüsel yaklaşım ile sentezlenen grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit örneklerinin kalite kriterlerine ait sayısal sonuçlar.

Deney No	I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub> (Raman)	Zeta Potansiyeli (ZETA-mv)		Parçacık Boyutu (ZETA-nm)		Yüzey Alanı (YA, nm) (BET)	C/O (SEM+EDS)	
		Seri 1	Seri 2	Seri 1	Seri 2		Seri 1	Seri 2
GO-Ref	0,96	-42,5	-44	290,8	279,3	15,95	1,93	2,00
GO-A2	1,47	-50	-49,3	223,1	223,2	14,51	3,35	2,90
GO-A3	1,45	-45,2	-45,5	150,1	162,2	22,22	2,25	2,11
GO-A4	1,30	-45,1	-45,8	178,3	178,2	34,74	0,89	0,85
RGO-A1	1,87	-30	-30,5	184,2	158	15,11	5,09	4,57
RGO-A2	1,49	-45,1	-45,8	236,9	220,1	11,15	2,96	2,39
RGO-A3	1,65	-42,2	-44,1	175,2	176,2	7,66	2,58	2,22
RGO-A4	1,44	-31,2	-31,3	186,2	199,9	19,71	1,10	1,11

Çalışmanın bu kısmında döngüsel yaklaşım ile sentezlenen grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit deneylerine ait iyileşme oranları ele alınmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde döngüsel yaklaşımında bazı sonuçlarda pozitif bir iyileşme olurken bazı sonuçlarda ise negatif bir iyileşme oranı bulunmuştur. Tablo 3’de sentezlenen grafen oksit örneklerine ait döngüye başlarken Hummers metodu ile sentezlenen GO-A1 örneği referans kabul (GO-Ref) edilerek iyileşme oranları hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** Sentezlenen grafen oksit örneklerinin GO-A1 (GO-Ref) örneğine göre hesaplanan iyileşme oranları.

	Yanıtlar	GO-Ref (GO-A1 <sup>*</sup> )	*GO-A2	GO-A3	GO-A4	<sup>b</sup> Optimum İyileşme Oranı (2)(%)	Optimum İyileşme Oranı (3)(%)	Optimum İyileşme Oranı (4)(%)
Grafen Oksit Döngüsü İyileşme Oranları	ID/IG (Raman)	0,96	1,47	1,45	1,30	-% 53,13	-% 51,04	-% 35,42
	Zeta Potansiyeli(mv)	-43,25	-49,65	-45,35	-45,45	%14,80	%4,86	%5,09
	Parçacık Boyutu (PB-nm)	285,05	223,15	156,15	178,25	<b>% 21,72<sup>b</sup></b>	% 45,22	% 37,47
	Yüzey Alanı (YA-m <sup>2</sup> /g) (BET)	15,95	14,51	22,22	34,74	-% 9,03	% 39,31	% 117,81
	C/O (SEM+EDAX)	1,97	3,13	2,18	0,87	-%58,89	-%10,66	%55,84
<sup>*</sup> GO-A1 göre % iyileşme oranlarının kalite kriterleri için hesaplanması Yüzde değişim = ((Yeni değer/Eski değer)-1)*100 <sup>b</sup> -((223,15/285,05)-1)*100 =21,72								

Tablo 3'te döngü metodu ile grafen oksit sentezinde yapıdaki kusur oranı artmış ancak ikinci döngüden sonra yapıdaki kusur oranı sabit kalmış ve düşme eğilimi göstermiştir. Yapıya bağlanan fonksiyonel gruplar döngüler arasında çok bir farklılık olmasa da son döngüde ise diğer döngülerden farklılık olmuş ve C/O oranında büyük bir düşüş gözlenmiştir. Zeta potansiyeli değerlerinde ise döngüler arasında büyük bir fark görülmemiştir. Parçacık boyutu ve yüzey alanı değerlerinde ise döngüler arasında kısmen iyileşme gözlenmiştir.

Tablo 4'te askorbik asit döngüsü ile sentezlenen indirgenmiş grafen oksit örneklerine ait döngüye başlarken rGO-A1 örneği referans alınarak iyileşme oranları hesaplanmıştır.

**Tablo 4.** Askorbik asit döngüsünde sentezlenen indirgenmiş grafen oksit örneklerinin rGO-A1 örneğine göre hesaplanan iyileşme oranları.

	Yanıtlar	rGO-A1 Ref	rGO-A2	rGO-A3	rGO-A4	Optimum İyileşme Oranı (1)(%)	Optimum İyileşme Oranı (2)(%)	Optimum İyileşme Oranı (3)(%)
İndirgenmiş Grafen Oksit Döngüsü İyileşme Oranları	Id/IG(Raman)	1,87	1,49	1,65	1,44	% 20,32	% 11,76	% 22,99
	Zeta Potansiyeli(mv)	-30,25	-45,45	-43,15	-31,25	% 50,25	%42,64	% 3,31
	Parçacık Boyutu (PB-nm)	171,1	228,5	175,7	193,05	-% 33,55	-% 2,69	-% 12,83
	Yüzey Alanı (YA-m <sup>2</sup> /g) (BET)	15,11	11,15	7,66	19,71	-% 26,21	-% 49,31	% 30,44
	C/O (SEM+EDAX)	4,83	2,68	2,40	1,11	-% 44,51	-%50,31	-%77,02

Tablo 4'te döngüsel indirgenmiş grafen oksit sentezinde D/G oranında düşüş gerçekleşirken, ikinci döngü itibarıyla C/O oranında artış beklenirken bir düşüş gözlenmiştir. Yüzey alanı, Zeta potansiyeli ve parçacık boyutu değerlerinde ise döngüler arasında dikkate değer bir fark gerçekleşmemiştir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada önceki kısımlarda da belirtildiği üzere döngüsel yaklaşım ile Hummers metodu ile grafen oksit ve kimyasal indirgenme metodu ile indirgenmiş grafen oksit sentezine odaklanılmıştır. İndirgenme kısmında çevre dostu yeşil indirgeyicilerden askorbik asit kullanılmış olup toplamda 4 döngü ile grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit sentezlenmiş ve döngülerin malzeme yapısına etkisi araştırılmıştır. Döngüsel yaklaşımda grafen oksit döngüsünde Zeta Potansiyeli, Parçacık boyut dağılımı ve yüzey alanı değerleri üzerinde olumlu etki gösterirken, kuvvetli oksidasyon neticesinde D/G değerinde artma gerçekleşmiş, C/O değerlerinde ise dikkate değer bir düşüş gözlenmiştir. Döngüsel yaklaşım grafen oksit sentezi üzerinde referans şartlarda ve mevcut literatürde çalışmalarına göre olumlu etki göstererek grafen oksidin özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir. İndirgenmiş grafen oksit döngüsünde, döngüler arasında D/G değerlerinde ve Zeta Potansiyeli değerlerinde iyileşme görülmüştür.

Parçacık boyutu değerlerinde etkili bir değişim gözlenmemiştir. Döngüsel yaklaşım ile sentezlenen grafen oksit örneklerinde yapıdaki fonksiyonel grupların oluşturduğu bağlar kuvvetli olması sebebiyle, döngüsel yaklaşımda kimyasal indirgenme verimini olumsuz etkileyerek, C/O oranlarında beklenen artış gözlemlenmemiş, referans şartlardaki koşullara göre olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir.

## Teşekkür

Bu araştırma Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından finanse edilen Bilimsel Araştırma Projesi (MF081123B33) desteği ile gerçekleştirilmiştir. Yazarlar Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Yönetim Birimi'ne (ÇAKÜ-BAP) teşekkür eder. H.K., fikir sahibi, deneyleri gerçekleştirdi. E.Y.M., H.K. E.B. ve M.R.A.B. sonuçları yorumladı, E.Y.M ve E.B. düzeltmeleri gerçekleştirdi, E.Y.M. ve H.K. makaleyi yazdı.

## Kaynaklar

- [1] Zhu K, Wen C, Aljarb AA, Xue F, Xu X, Tung V, Zhang X, Alshareef H N, Lanza M. The development of integrated circuits based on two-dimensional materials. *Nat Electron* 2021;4:775–785.
- [2] Bai, Y, Xu, T, & Zhang, X. Graphene-based biosensors for detection of biomarkers. *Micromachines*, 2020; 11(1):60-79.
- [3] Su H, Hu YH. Recent advances in graphene-based materials for fuel cell applications. *Energy Sci Eng* 2021;9:958–983.
- [4] Jia Y, Zhang J, Kong D, Zhang C, Han D, Han J, et al. Practical Graphene Technologies for Electrochemical Energy Storage. *Adv Funct. Mater.* 2022;32:1–17.
- [5] Chen Z, Narita A, Müllen K. Graphene Nanoribbons: On-Surface Synthesis and Integration into Electronic Devices *Adv Mater* 2020;32:1–26.
- [6] Song S, Shen H, Wang Y, Chu X, Xie J, Zhou N, Shen J. Biomedical application of graphene: From drug delivery, tumor therapy, to theranostics. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*. 2020;185:110596.
- [7] Madenli Ö, Deveci Eu, Gönen Ç. Ağır Metal Gideriminde Grafen Uygulamaları Adsorpsiyon Teknolojisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi* 2021;33:151–9.
- [8] Bhol P, Yadav S, Altaee A, Saxena M, Misra PK, Samal AK. Graphene-Based Membranes for Water and Wastewater Treatment: A Review. *ACS Appl Nano Mater* 2021;4:3274–93.
- [9] Al-Gaashani, R, Najjar, A, Zakaria, Y, Mansour, S, & Atieh, M. A. XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods. *Ceramics International*, 2019;45(11), 14439-14448.
- [10] Hummers WS, Offeman RE. Preparation of Graphitic Oxide. *J Am Chem Soc* 1958;80:1339.
- [11] Marcano DC, Kosynkin DV, Berlin JM, Sinitskii A, Sun Z, Slesarev A, et al. Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano* 2010;4:4806–14.
- [12] Wang, JB, Ren, Z, Hou, Y, Yan, XL, Liu, P Z, Zhang, H, & Guo, J J. A review of graphene synthesis at low temperatures by CVD methods. *New Carbon Materials*, 2020;35(3):193-208.
- [13] Korucu, H. Evaluation of the performance on reduced graphene oxide synthesized using ascorbic acid and sodium borohydride: Experimental design-based multi-response optimization application. *Journal of Molecular Structure*, 2022;1268: 133715.
- [14] Palomba, M, Carotenuto, G, & Longo, A. A brief review: the use of L-ascorbic acid as a green reducing agent of graphene oxide. *Materials*, 2022; 15(18):6456.
- [15] Trikkaliotis, D G, Christoforidis, A K, Mitropoulos, A C, & Kyzas, G Z. Graphene oxide synthesis, properties and characterization techniques: a comprehensive review. *ChemEngineering*, 2021; 5(3):64
- [16] Wu, J B, Lin, M L, Cong, X, Liu, HN, & Tan, P H. Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*, 2018;47(5), 1822-1873.
- [17] Chen, X, Qu, Z, Liu, Z, & Ren, G. Mechanism of oxidization of graphite to graphene oxide by the hummers method. *ACS omega*, 2022;7(27), 23503-23510.

## Kıyıya Dik Kum Barlarının Bitiş Noktasının Yapay Zeka Yöntemleriyle Tahmini

Mert SABANCIOĞLU<sup>1\*</sup>, Fatih ÜNEŞ<sup>2</sup>, Mustafa DEMİRCİ<sup>3</sup>, Bestami TAŞAR<sup>4</sup>, Yunus Ziya KAYA<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye  
<sup>5</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye

\*<sup>1</sup>[msabancioglu.lee22@iste.edu.tr](mailto:msabancioglu.lee22@iste.edu.tr), <sup>2</sup>[fatih.unes@iste.edu.tr](mailto:fatih.unes@iste.edu.tr), <sup>3</sup>[mustafa.demirci@iste.edu.tr](mailto:mustafa.demirci@iste.edu.tr), <sup>4</sup>[bestami.tasar@iste.edu.tr](mailto:bestami.tasar@iste.edu.tr),  
<sup>5</sup>[yunuszkaya@osmaniye.edu.tr](mailto:yunuszkaya@osmaniye.edu.tr)

(Geliş/Received: 27/12/2023;

Kabul/Accepted: 10/07/2024)

**Öz:** Kıyıya dik katı madde sonucu oluşan kumbar parametrelerinin tahmini, kıyı yapılarının tasarımı için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, kıyıya dik kum barlarının bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesi (Xs) tahmini için deneysel veriler kullanılmıştır. Deneylerde 5 farklı ortalama tane çapı  $d_{50}=0,25, 0,32, 0,45, 0,62$  ve  $0,80$  mm ve  $1/8, 1/10$  ve  $1/15$  olmak üzere 3 farklı taban eğimi kullanılmıştır. Bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesinin tahmini için farklı kıyı eğimleri, farklı tane çaplarındaki kıyı malzemeleri, farklı dalga periyodu ve dalga dikliği girdi parametresi olarak kullanılarak çoklu doğrusal regresyon, destek vektör regresyonu, basit üyelik fonksiyonları ve bulanık kural oluşturma tekniği (Simple Membership Functions and Fuzzy Rule Generation Technique-SMRGT) ve uyarlamalı ağ tabanlı sistemi yöntemleri ile modeller oluşturulmuştur. Model sonuçlarına göre uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi modelinin diğer iki modele göre daha düşük hata değerleri verdiği ve determinasyon katsayısına göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Kıyıya dik sediment taşınımı, bar parametreleri, bulanık mantık, ANFIS, çoklu doğrusal regresyon, destek vektör regresyonu.

## Estimation of Ending points of Cross-Shore Sandbars using Artificial Inteligence Method

**Abstract:** Estimation of sandbar parameters occurred by cross-shore sediment transport is very important for the design of coastal structures. In this study, the experimental data utilized to estimate the distance of the ending point of cross-shore sandbars (Xs). In the experiments, 5 different average grain diameters  $d_{50}=0.25, 0.32, 0.45, 0.62$  and  $0.80$  mm and 3 different base slopes of  $1/8, 1/10$  and  $1/15$  were used. Multiple linear regression, Sequential Minimal Optimization algorithm for support vector machine Regression, Simple Membership Functions and Fuzzy Rule Generation Technique (SMRGT) and Adaptive neuro fuzzy inference system were used to estimate the ending point of cross-shore ending bars to the shoreline using input parameters as different coastal slopes, different sediment diameters, different wave periods and wave steepness. According to the model results, it was seen that the adaptive network-based fuzzy inference system model was more successful than the other three models with lower error values and higher coefficient of determination.

**Key words:** Cross-shore sediment transport, bar parameter, fuzzy logic, ANFIS, multi linear regression, support vector regression.

### 1. Giriş

Kıyılarda sediment taşınımı kıyı yapıları tasarımı için oldukça önemlidir. Kıyı yapılarının tasarımında dalga yüksekliği, dalga boyu, dalga periyodu, kıyı taban eğimi ve kıyı yatağının materyal özellikleri oldukça önemli parametrelerdir. Kıyıya dik sediment taşınımı sonucu oluşan barların davranışını anlamak ve parametrelerini tahmin etmek kıyı yönetimi ve kıyı mühendisliği için büyük önem taşır. Ayrıca, bu parametrelerin doğru tahmini sayesinde kıyılarda oluşabilecek erozyonlar engellenebilir veya etkileri azaltılabilir.

Birçok araştırmacı kıyıya dik sediment taşınımı ve kıyı özellikleri üzerine çalışmışlardır [1-5]. Kıyı profilleri, [6-9] tarafından sınıflandırılmıştır. Sunamura ve Kiyoshi [10], tarafından dalga kırılma bölgesinde iç-dış kıyı bölgesinde kum taşınımını tanımlayan bir model sunmuşlardır. Bu model, net taşınımın bir denge durumuna ulaştığı fiziksel düşünceye dayanır. Araştırmacılar, kıyı eğiminin başladığı yerden topografyanın yer değişimini temel alan bir kıyı sınıflandırması önerdiler. Larson vd. [11], erozyon ve sedimentasyon profilleri üzerine çalışmalar yaptılar ve erozyon ve sedimentasyon kriterleri için deneysel veri kullanarak önceki çalışmalarda elde edilen deney verilerinden kıyı profili parametrelerini elde ettiler. Watanabe vd. [12], kıyıya dik katı madde taşınımını tahmin etmek için 3 boyutlu model üretti. Larson [13], düzenli dalgaların etkisi altında kıyıya dik profillerindeki katı madde taşınımını ve kıyı profilini hesaplamak için sayısal bir model geliştirdi. Hsu [14], çalışmasında kıyı profillerinin denge durumunu kıyıya dik hareket eden dalgaların değişken açılarının sebep

\* Sorumlu yazar: [msabancioglu.lee22@iste.edu.tr](mailto:msabancioglu.lee22@iste.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0007-5617-4076, <sup>2</sup> 0000-0001-5751-6970, <sup>3</sup> 0000-0002-3249-2586, <sup>4</sup> 0000-0003-4842-3937, <sup>5</sup> 0000-0002-4357-9177

olduğu çıkarımını yapmıştır. Ruessink vd. [15] uzaktan algılama metodu ile yakın kıyı bölgesindeki bar tepelerinin uzun süreli değişimini incelemiştir. Günaydın ve Kapdaşlı [16] tane çapının 0,35mm ve kıyı eğiminin 0,2 olduğu bir model ile kıyı erozyonunun karakteristiğini incelemiştir. Günaydın ve Kapdaşlı [17], çalışmada fiziksel model kullanarak dalga etkili iç kıyı barlarının geometrik karakteristiğini incelemiştir. Kömürcü vd. [18], deneysel çalışmalardan elde ettiği bar parametrelerini belirlemek için regresyon analizi yaptı ve bar parametreleri için denklemler üretmiştir. Rózyński [19], Güneybatı Baltık sahillerinde 0,22mm çaplı malzemelerden uzun süreli gözlem değerlerini kullanarak korelasyon analizi yaptı. Özölçer[20], dalga kanalında düzenli dalga ve erozyon profilinin geometrik özelliklerini kullanarak erozyon profilini belirledi. Sonuçlar, deneysel verilere ve daha önce geliştirilen denklemlere uyum sağlamıştır. Demirci ve Aköz [21], fırtına profilini farklı kıyı malzemeleri farklı kıyı eğimleri kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır.

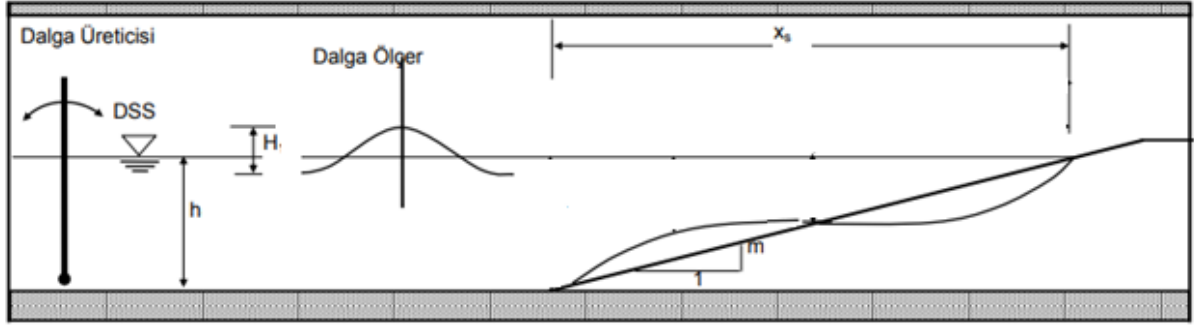
Geçmiş yıllarda, bulanık mantık ve yapay zekâ yöntemleri ile ilgili yapılmış birçok mühendislik çalışması bulunmaktadır [22-30]. Günümüzde veri analizi ve tahmin amaçları için farklı modelleme yöntemleri oldukça önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, yapay zekâ ve veri madenciliği teknikleri, karmaşık veri setlerini anlamak ve geleceği tahmin etmek için önemli bir rol oynamaktadır. Demirci vd. [31] Hatay’da gerçekleştirilen bir çalışmada, aylık toplam yağış miktarı, aylık ortalama sıcaklık ve Kumlu bölgesi yeraltı su seviyesi verilerini kullanarak tahminler yapmıştır. Bu tahminler için çoklu doğrusal regresyon ve yapay sinir ağları modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, yapay sinir ağları modelinin daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Taşar vd. [32], çalışmalarında Cambridge havzasındaki günlük buharlaşma miktarı ampirik yöntemlerle ve yapay sinir ağları modellemesi ile tahmin edilmeye çalışmıştır. Ampirik metotlar problemin çözümünde iyi performans göstermiştir. Fakat ampirik yöntemler ile yapay sinir ağları model sonuçları karşılaştırıldığında yapay sinir ağları modeli ampirik yöntemlere göre daha iyi performans elde ettiği gözlemlenmiştir. Üneş vd. [33], Güney Carolina eyaletinde bulunan Hartwell gölünün buharlaşma miktarını ampirik metot ve yapay sinir ağları modeli ile tahmin etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada günlük ortalama sıcaklık, rüzgâr hızı, güneş ısınımı ve bağıl nem verileri kullanılmıştır. Ampirik metotlar iyi sonuç verse de yapay sinir ağları modeli daha iyi performans göstermiştir. Dayan vd. [34] çalışmada Patapsco nehri üzerinde bulunan gözlem istasyonundan alınan verileri kullanarak çoklu doğrusal regresyon ve bulanık mantık modeli ile oluşturmuştur. Bulanık Mantık modeli için basit üyelik fonksiyonları ve bulanık kural oluşturma tekniği (Simple Membership Functions and Fuzzy Rule Generation Technique – SMRGT) yöntemi kullanılmıştır. Bu modellerle Patapsco nehri üzerindeki katı madde taşınımını tahmin etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada ise en iyi tahmin performansı gösteren bulanık mantık modeli olmuştur. Er vd. [35] çalışmada Alibey barajı için buharlaşma tahmini yapmıştır. Tahmin için çoklu doğrusal regresyon metodu, bulanık mantık modeli ve yapay sinir ağları modeli oluşturmuş ayrıca bulanık mantık modeli için SMRGT metodunu kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda bulanık mantık modelinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Saplıoğlu ve Acar [36] çalışmada Fırat havzası üzerindeki 3 istasyon bölgesinden elde edilen veri ile uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (Adaptive neuro fuzzy inference system–ANFIS), yapay sinir ağları (YSA) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) gibi modellerle Fırat havzasındaki sediment taşınımını tespit etmeye çalışmıştır. Yapılan çalışmada ANFIS modeli YSA ve ÇDR modeline göre daha başarılı sonuç vermiştir.

Bu çalışmada, Demirci [37]’den elde edilen deney verileri kullanılarak kıyıya dik katı madde sonucu oluşan bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesinin tahmini için ÇDR, destek vektör regresyonu (Sequential Minimal Optimization algorithm for support vector machine Regression – SMOReg), bulanık SMRGT ve ANFIS yöntemleri ile modeller oluşturulmuş ve modellerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

## 2. 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1.Deney Düzenegi

Bu çalışmada Demirci [37]’den elde edilen deney verileri bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesinin tahmini için kullanılmıştır. Toplam 64 veriden oluşan deney sonuçlarının %80’i eğitim, %20’si test olarak ayrılmıştır. Fırtına profili altındaki deneyler 12m uzunluğunda 0,40m genişliğinde ve 0,60m derinliğindeki dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. (Şekil 1) Laboratuvar deneyleri ile çeşitli değişkenler kullanılarak farklı senaryolar altında kıyı profilleri incelendi. Kanaldaki dalgalar pedal tipi dalga üreticisi ile üretildi. Deneyler için 0,47s ve 0,83s periyotları arasında düzenli dalgalar üretildi ve 1/8, 1/10 ve 1/15 kıyı eğimlerinde deneyler gerçekleştirildi. Deneylerde 0,25mm, 0,32mm, 0,46mm 0,62mm ve 0,8mm ortalama tane çaplarına sahip 5 farklı malzeme kullanıldı.



Şekil 1. Deney Düzeneği [37].

## 2.2. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık, Zadeh [38] çalışmasına dayanarak geliştirilmiştir. Klasik mantıktan farkı, klasik mantık kesinlik ifade ederken, bulanık mantık kesinlik ifade etmekle birlikte bulanıklık kavramını da kullanır.

Bulanık mantıkta bulanıklaştırma adımı ile üyelik fonksiyonları belirlenir. Üyelik fonksiyonları sözel olarak az, ortalama, çok vb. gibi isimlendirilebilir. Matematiksel olarak üçgen, trapez vb. gibi grafiklerle ifade edilir. Aynı parametre için girilen üyelik fonksiyonlarının kesişim noktaları oluşturur. Diğer parametrelerle bulanık kural tabloları ile birleştirilen üyelik fonksiyonları çıktı değerlerini oluşturur. Durulama işlemi ile sayısal veri elde edilerek mühendislik alanında kullanılabilir hale gelir.

Bu çalışmada üyelik fonksiyonlarının ve bulanık kural tablolarının oluşturulması için SMRGT yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde  $V_{max}$  ve  $V_{min}$  değerleri bağımlı ve bağımsız değişkenlerin her biri için belirlenir ve değişkenlerin aralıkları belirlenir. Üyelik fonksiyonlarının geometrik şekillerine karar verilir. Bu yöntemde göre üyelik fonksiyonları üçgen veya trapez olarak seçilebilir. Üyelik fonksiyonlarının kesişim aralığını ifade eden birim genişlik (Unit Width–UW) (2) ve genişletilmiş birim genişlik (Enhanced Unit Width–EUW) (3) denklemleri ile hesaplanır. Üyelik fonksiyonlarının tepe noktalarını ifade eden ( $C_i$ ) ve anahtar ( $K_i$ ) değerleri ise denklem (4-8) ile hesaplanır Toprak vd. [39].

$$V_R = V_{max} - V_{min} \quad (1)$$

$$U_w = \frac{V_R}{n_u} \quad (2)$$

$$E_{UW} = \frac{3U_w}{2} \quad (3)$$

$$C_i = K_i = \frac{V_R}{2} + V_{min} \quad (4)$$

$$C_{i+1} = K_{i+1} = V_{max} - \left(\frac{V_{max} - K_i}{2}\right) \quad (5)$$

$$C_{i-1} = K_{i-1} = V_{min} + \left(\frac{K_i - V_{min}}{2}\right) \quad (6)$$

$$K_1 = V_{min} + \frac{E_{uw}}{3} \quad (7)$$

$$K_S = V_{max} - \frac{E_{uw}}{3} \quad (8)$$



### 2.3.Çoklu Doğrusal Regresyon

Çoklu doğrusal regresyon bağımlı değişkenlerin birden fazla bağımsız değişkenle ilişkisini modellemek için kullanılan yöntemdir. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi doğrusal bir denklem kurarak ifade eder. Bu denklem sabit sayı ve bağımsız değişkenlerin katsayısından oluşur. Bu denklemin sonucu bağımlı değişkeni tahmin etmemizi sağlar (Denk. 9).

$$y_0 = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \quad (9)$$

Bu denklemde “ $y_0$ ” bağımlı değişkeni, “ $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ ” bağımsız değişkenleri, “ $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_n$ ” bağımsız değişken kat sayılarını ve “ $\beta_0$ ” sabit katsayıyı ifade etmektedir.

### 2.4.Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi

Bu sistem temel olarak bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleşimidir. Jang ve Sun [40] tarafından geliştirilmiştir ve Takego-Sugeno bulanık çıkarım sistemine dayanmaktadır. Bu sistemde yapay sinir ağları bağımsız değişkenleri eğiterek bulanık küme, alt küme ve kuralları oluşturur ardından durulama yaparak sayısal çıktı alınmasını sağlar. Bu model 5 katmandan oluşmaktadır.

Birinci tabaka üyelik fonksiyonlarının hesaplandığı ve büyük, çok, orta, küçük ve az vb. gibi izafi isimlendirmelerin yapıldığı tabakadır. Bu tabakaya bulanıklaştırma adı verilir.

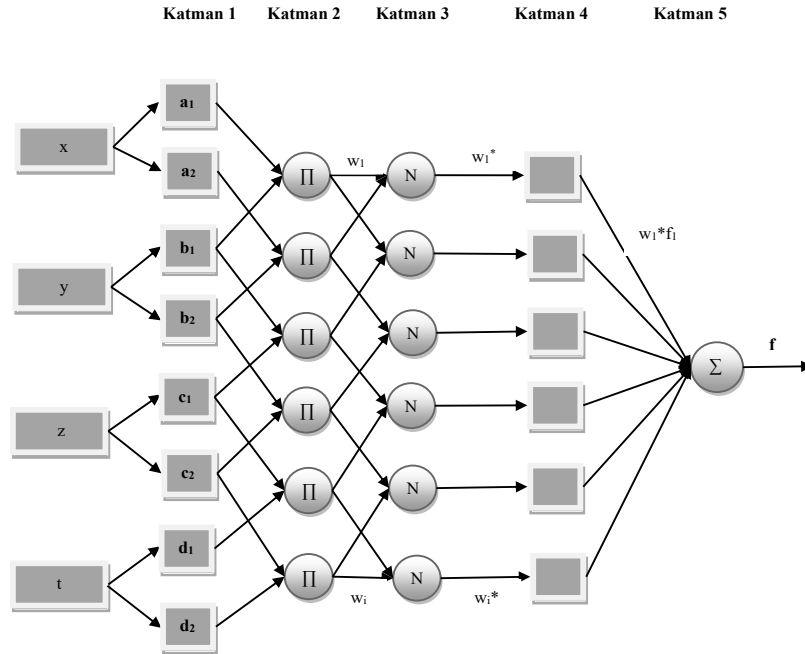
İkinci tabaka kuralların oluşturulduğu katmandır. Bu tabakada giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları ile ilişkisi irdelenir ve bu üyelik fonksiyonlarının belirli kombinasyonu ile çıktı üyelik fonksiyonları ilişkilendirilir.

Üçüncü tabaka normalleştirme tabakasıdır. Kural tablosuna göre girdi değerlerinin oluşturduğu alt kümelerin geometrik toplamı hesaplanır. Hesaplanan geometrik şeklin ağırlık merkezi hesaplanarak çıktı verisi elde edilir.

Dördüncü tabakada ise bulanıklaştırılmış değerlerin birleştirilerek kesin bir değer elde edilir. Bu tabakaya durulama adı verilir.

Beşinci tabaka ise tüm değerlerden gelen kesin değerler birleştirilerek nihai bir sonuç elde edilir. Bu tabakaya çıktı tabakası denir.

Dört giriş ve bir çıkışlı modelinin tabakaların görseli Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Dört Girişli Bir Çıkışlı ANFIS Modeli [41].

Bu model açık kaynak kodlu WEKA yazılımı kullanılarak çalışılmıştır. SMOReg yaklaşımı Support Vector Machines (SVM) yaklaşımının bir uygulaması olarak düşünülebilir. Yaklaşımın uygulanmasında, Smola ve Schölkopf [42] esas alınmaktadır. Algoritma seçiminde en popüler WEKA algoritmalarından olan düzenlenmiş SMOReg olarak geçen RegSMOImproved kullanılmıştır. Bu algoritma, Shevade ve Keerthi [43] tarafından geliştirilmiştir. Çalışmada oluşturulan modelde numerik çalışmaya imkân tanıyan çekirdek fonksiyonlarından olan RBF kernel çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır.

### 3. Bulgular

Modellemeler deney verilerinden elde edilen dört bağımsız ve bir bağımlı değişken ile gerçekleştirilmiştir. Bağımsız değişkenler dalga dikliği ( $\frac{H_0}{L_0}$ ), dalga periyodu ( $T$ ), kıyı yatağı eğimi ( $m$ ) ve ortalama tane çapından ( $d_{50}$ ) oluşmaktadır. Bağımlı değişken ise bar bitiş noktasının kıyı çizgisine kadar olan uzaklığı ifade eden ( $X_s$ )dir. Toplam 64 veriden oluşan deney sonuçları %80 eğitim, %20 test olarak ayrılmıştır. Modellerde kullanılan bağımlı ve bağımsız değişken korelasyon katsayıları Tablo 1 de verilmiştir.

Bulanık mantık modellemesi için bağımsız değişkenlerden  $H_0/L_0, T, m, d_{50}$  ve bağımlı değişken  $X_s$  için 5 üyelik fonksiyonu bağımsız değişken  $m$  için 3 üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Çalışmada bulanık mantık için SMRGT yöntemi kullanılmıştır. SMRGT ile oluşturulan üyelik fonksiyonları Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki çapraz korelasyon değerleri.

	$d_{50}(m)$	$m$	$T(sn)$	$H_0/L_0$	$x_s (m)$
$d_{50}(m)$	1				
$m$	0,09035	1			
$T(sn)$	-0,413	-0,0391	1		
$H_0/L_0$	0,47827	0,00039	-0,8704	1	
$x_s (m)$	-0,2676	-0,8857	-0,1104	0,16824	1

**Tablo 2.** SMRGT yöntemi üyelik fonksiyonu sınır değerleri.

	$H_0/L_0$	$T$	$m$	$d_{50}$	$X_s$
$V_{min}$	0,07	0,47	0,067	0,25	1,05
$V_{max}$	0,26	0,83	0,125	0,8	2,99
$V_R$	0,19	0,36	0,058	0,55	1,95
$n_u$	8	8	4	8	8
$U_w$	0,02375	0,045	0,0145	0,06875	0,24
$O$	0,011875	0,0225	0,00725	0,03437	0,12
$E_{uw}$	0,035625	0,0675	0,02175	0,10312	0,365
$C_i - 1$	0,1175	0,56	-	0,3875	1,54
$C_i$	0,265	0,65	0,096	0,525	2,02
$C_i + 1$	0,2125	0,74	0,07425	0,6625	2,51
$K_1$	0,081875	0,4925	0,11775	0,7656	1,17
$K_s$	0,248125	0,8075	-	0,2844	2,87

Elde edilen veriler gözlemlenerek 120 tane bulanık kural tablosu oluşturulmuştur. Bulanık kural tablosu oluşturulurken genel olarak SMRGT yöntemi kullanılmıştır fakat deneysel veriler gözlemlendiğinde dalga dikliği ve dalga periyodu kendi arasında ters orantılıdır. Bu sebeple ikisinin de “Çok Yüksek ve Çok Yüksek” veya “Çok Az ve Çok Az” gibi olduğu durumlar bulunmadığından bu gibi durumlar kural tablosuna eklenmemiştir.

ANFIS modelinde bulanık kümeleri elde etmek için jenerasyon bulanık çıkarım sistemi “Grid Partition” kullanılmıştır. Girdi üyelik fonksiyon sayıları “2x2x2x2” ve üyelik fonksiyonu tipi “gbell” seçilmiştir. Çıktı üyelik fonksiyon tipi ise sabit seçilmiştir.

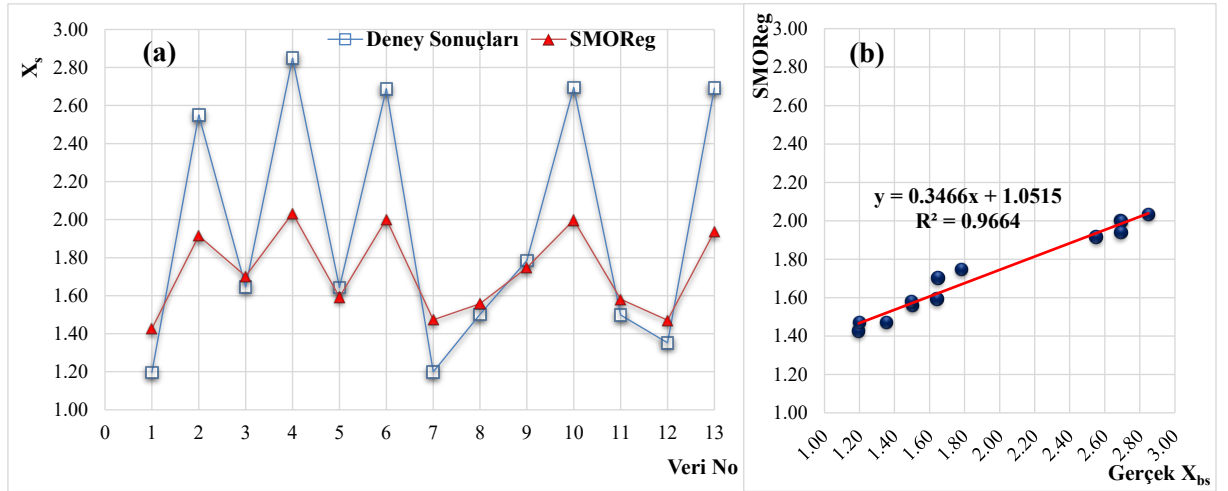
Ayrıca ortalama tane çapı ( $d_{50}$ ), kıyı yatağı eğimi ( $m$ ), dalga periyodu ( $T$ ), dalga dikliği ( $\frac{H_0}{L_0}$ ) bağımsız değişkenleri ve bar bitiş noktasının kıyıya uzaklığı ( $X_s$ ) bağımlı değişkeni kullanılarak ÇDR modeli oluşturulmuştur. Model sonunda bağımsız değişken katsayıları ve sabit sayı Denk.10’da verilmiştir.

$$X_s = 3,41 - 1010,81d_{50} - 18,73m + 0,21T + 3,53\left(\frac{H_0}{L_0}\right) \quad (10)$$

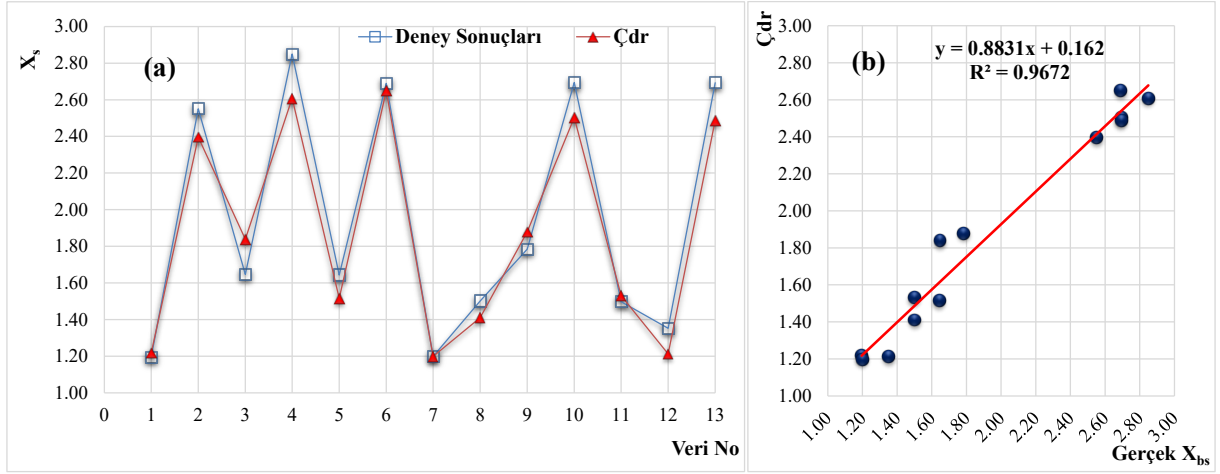
Bu çalışmada ÇDR, Bulanık SMRGT, uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve SMOREG ile modelleme yapılmıştır. Toplam 64 veriden oluşan deney sonuçları %80 eğitim, %20 test olarak ayrılmıştır. Yapılan modellemelerin test verileri üzerinden elde edilen istatistiksel değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Modellerin Performans Değerleri.

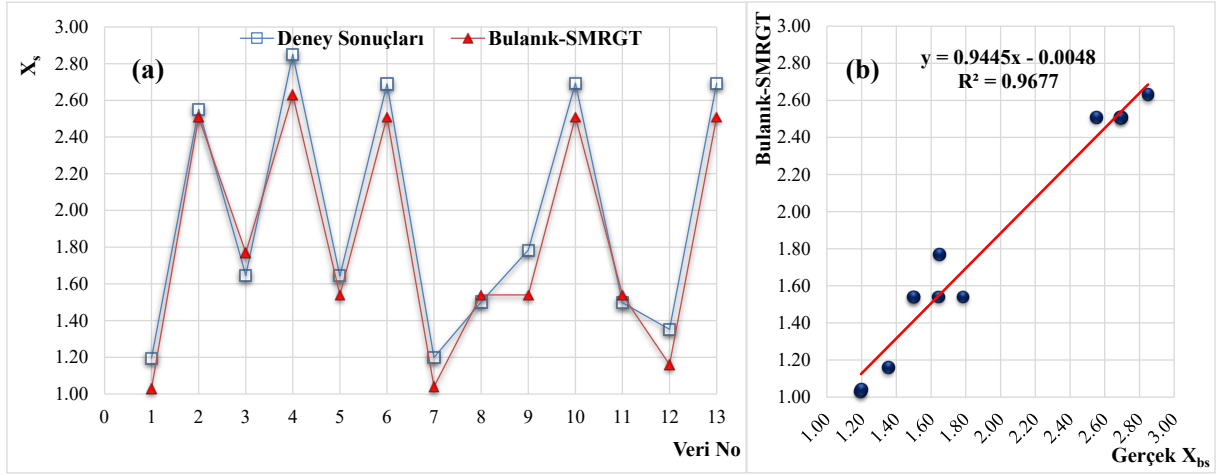
	SMOReg	Çoklu Doğrusal Regresyon	Bulanık SMRGT	ANFIS
<b>MAE</b>	0,346	0,118	0,144	0,078
<b>MSE</b>	0,267	0,088	0,094	0,078
<b>RMSE</b>	0,517	0,297	0,306	0,279
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9664	0,9672	0,9677	0,9794



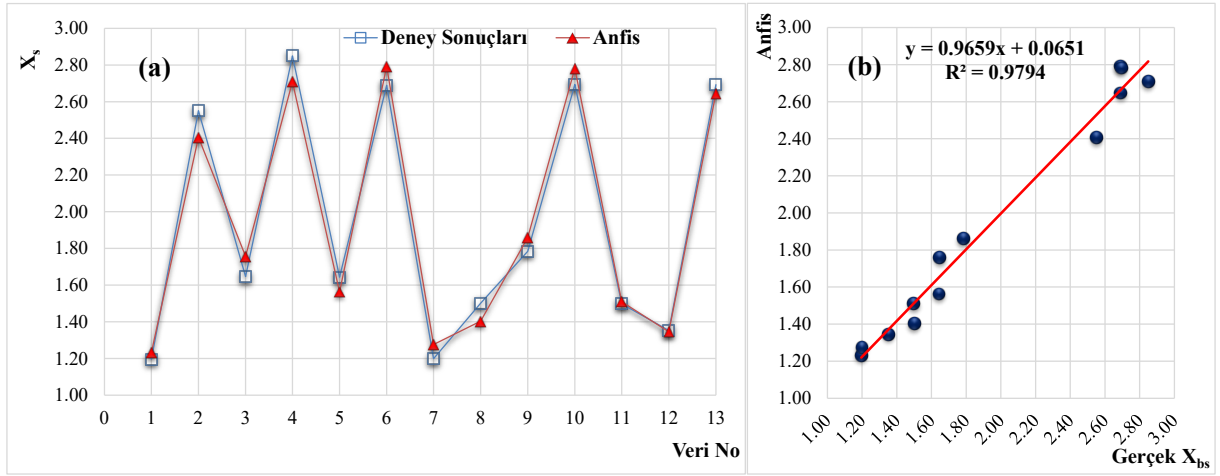
Şekil 3. SMOReg modeline ait (a) Dağılım ve (b) Saçılım Grafikleri.



Şekil 4. ÇDR modeline ait (a) Dağılım ve (b) Saçılım Grafikleri.



Şekil 5. Bulanık SMRGT modeline ait (a) Dağılım ve (b) Saçılım Grafikleri.



Şekil 6. ANFIS modeline ait (a) Dağılım ve (b) Saçılım Grafikleri.

Bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesi (Xs) test verileri için SMOReg modeline ait dağılım ve saçılım grafikleri sırasıyla Şekil 2’de, ÇDR modeline ait dağılım ve saçılım Şekil 3’ te, Bulanık SMRGT modeline ait dağılım ve saçılım grafikleri Şekil 4’te, ANFIS modeline ait dağılım ve saçılım grafikleri Şekil 5’te gösterilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, SMOReg modeli dağılım sonuçlarına göre deney verileri ile model sonuçları arasında düşük bir yakalama oranı olduğu görülmektedir. SMOReg yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçlara göre determinasyon katsayısının 0,9664 olarak hesaplandığı görülmektedir. ÇDR modeli için Şekil 3’ de ki dağılım grafiği incelendiğinde deney verileri ile tahmin verileri arasında uyum olduğu görülmektedir. Saçılım grafiğine bakıldığında yüksek korelasyon olduğu ve determinasyon katsayısının  $R^2=0,9672$  olduğu görülmektedir. Şekil 4’te ki Bulanık SMRGT modeline ait dağılım ve saçılım grafikleri incelendiğinde ÇDR yöntemi ile Bulanık SMRGT yöntemi sonuçları yakın sonuçlar göstermiştir. Deney verileri ile tahmin verileri arasında uyum olduğu görüldüğü ve yüksek determinasyon katsayısı gözlenmiştir. ( $R^2=0,9677$ ). Şekil 5’ te ANFIS modeline ait dağılım ve saçılım grafikleri incelendiğinde ANFIS modeli tahminlerinin diğer modellere göre daha az dağınık olduğu ve yüksek determinasyon katsayısı gözlenmiştir. Tablo 3 incelendiğinde diğer modellerle kıyaslandığında ANFIS model sonuçları ÇDR, Bulanık SMRGT ve SMOReg modellerine göre daha düşük MSE, MAE ve daha yüksek  $R^2$  değerlerine sahip olduğu için bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesi (Xs) tahmininde en iyi sonucu göstermiştir. (MSE = 0,78, MAE=0,78,  $R^2=0,9794$ ).

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada Demirci [37]’den elde edilen deney verileri bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesi (Xs) tahmini için kullanılmıştır. Toplam 64 veriden oluşan deney sonuçları %80 eğitim, %20 test olarak ayrılmıştır. Bar bitiş noktasının tahmini için bulanık mantık, çoklu doğrusal regresyon ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi modelleri oluşturulmuştur. Bulanık Mantık üyelik fonksiyonları ve kural tablosu için (SMRGT) yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulan Bulanık SMRGT, destek vektör regresyonu (SMOReg), Çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) modellerinin performans değerlendirmesi için determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare hatası (MSE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) hesaplanmıştır.

Oluşturulan modellerin performans değerlendirmesi neticesinde tüm modeller bar bitiş noktasının kıyı çizgisine olan mesafesi (Xs) tahmininde başarılı olmuştur.

ÇDR yöntemi ile Bulanık SMRGT yöntemi sonuçları birbirine yakın sonuçlar göstermiştir. SMOReg yaklaşımı ise nispeten daha az uyumlu sonuçlar vermiştir.

Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) modelinin diğer üç modele göre daha düşük hata değerleri yüksek determinasyon katsayısına göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

#### Kaynakça

- [1] Saville JT. Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th Meeting Int. Assoc. Hydraulic Res, 3, 1957.
- [2] Dean RG. Heuristic models of sand transport in the surf zone, First Australian Conference on Coastal Engineering, Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Sydney, NSW: Institution of Engineers, Australia, 1973.
- [3] Noda EK. Equilibrium beach profile scale-model relationship, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division 1972, 98(4), 511-528.
- [4] Gourlay, MR. Beaches: profiles, processes and permeability, Coastal Engineering, 1980, 1320-1339.
- [5] Sawaragi T, Ichiro D. On-offshore sediment transport rate in the surf zone, Coastal Engineering, 1980, 1194-1214.
- [6] Johnson JW. Scale effects in hydraulic models involving wave motion, Eos, Transactions American Geophysical Union, 1949, 30(4), 517-525.
- [7] Iwagaki Y, and Hideaki N. Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, Coastal Engineering Proceedings, 1962, 8, 14-14.
- [8] Nayak IV. Equilibrium profiles of model beaches, Coastal Engineering, 1970, 1321-1340.
- [9] Hattori M, Ryoichi K. Onshore-offshore transport and beach profile change, Coastal Engineering 1980, 1175-1193.
- [10] Sunamura T, and Kiyoshi H. Two dimensional beach transformation due to waves, Coastal Engineering, 1974, 920-938.
- [11] Larson M, Kraus NC, Byrnes MR. Numerical model for simulating storm-induced beach change, Technical Report US Army Corps of Engineers, 1989.
- [12] Watanabe A, Yoshihiko R, Kiyoshi H. Beach profiles and on-offshore sediment transport, Coastal Engineering 1980, 1106-1121.
- [13] Larson M. Model of beach profile change under random waves, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1996, 122(4), 172-181.
- [14] Hsu TW. Geometric characteristics of storm-beach profiles caused by inclined waves, Ocean Engineering, 1998, 25(1), 69-84.
- [15] Ruessink BG, Bell PS, Van Enkevort IMJ, Aarninkhof SGJ. Nearshore bar crest location quantified from time-averaged X-band radar images, Coastal Engineering, 2002, 45(1), 19-32.

- [16] Günaydın K, Kabdaşlı MS. Characteristics of coastal erosion geometry under regular and irregular waves, *Ocean Engineering*, 2003, 30(13), 1579-1593.
- [17] Günaydın K, Kabdaşlı MS. Investigation of offshore bar geometry under regular and irregular waves, *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(2) 374-382.
- [18] Kömürçü Mİ, Özölçer İH, Yüksek Ö, Karasu S. Determination of bar parameters caused by cross-shore sediment movement, *Ocean engineering*, 2007, 34(5-6), 685-695.
- [19] Różyński, G. Data-driven modeling of multiple longshore bars and their interactions, *Coastal Engineering*, 2003, 48(3), 151-170.
- [20] Özölçer İH. An experimental study on geometric characteristics of beach erosion profiles *Ocean Engineering*, 2008, 35(1), 17-27.
- [21] Demirci M, Aköz MS. An investigation on the formation of submerged bar under surges in sandy coastal region, *China Ocean Engineering*, 2012, 26, 535-546.
- [22] Üneş F, Joksimovic D, Kisi O. Plunging flow depth estimation in a stratified dam reservoir using neuro-fuzzy technique, *Water resources management*, 2015, 29, 3055-3077.
- [23] Kaya YZ, Mamak M, Unes F. Evapotranspiration prediction using MST data mining method, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2016, 3(12), 236973.
- [24] Pham QB, Mohammadi B, Moazenzadeh R, Heddam S, Zolá RP, Sankaran A, Anh DT. Prediction of lake water-level fluctuations using adaptive neuro-fuzzy inference system hybridized with metaheuristic optimization algorithms, *Applied water science*, 2023, 13(1), 13.
- [25] Unes F, Yildirim S, Cigizoglu H, Coskun H. Estimation of dam reservoir volume fluctuations using artificial neural network and support vector regression. *Journal of Engineering Research*, 2013, 1(3), 53-74.
- [26] Ghafari H, Hadi AK. Simulation of daily suspended sediment of Roud-Zard River using different machine learning techniques, *Agricultural Engineering*, 2023, 46(1), 101-119.
- [27] Üneş F, Demirci M, Mertcan Z, Taşar B, Varçin H, Kaya YZ. Determination of groundwater level fluctuations by artificial neural networks, *Natural and Engineering Sciences*, 3(3), 35-42.
- [28] Roy DK, Sarkar TK, Biswas SK, Datta B. Generalized daily reference evapotranspiration models based on a hybrid optimization algorithm tuned fuzzy tree approach, *Water Resources Management*, 2023, 37(1), 193-218.
- [29] Üneş F, Demirci M, Zelenakova M, Çalışıcı M, Taşar B, Vranay F, Kaya YZ. River flow estimation using artificial intelligence and fuzzy techniques, *Water*, 2020, 12(9), 2427.
- [30] Üneş F, Demirci M. Generalized regression neural networks for reservoir level modeling, *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 2015, 3, 81-84.
- [31] Demirci M, Unes F, Kaya YZ, Mamak M, Tasar B, & Ispir E. Estimation of groundwater level using artificial neural networks: a case study of Hatay-Turkey, 10th International Conference Environmental Engineering, 2017.
- [32] Taşar B, Unes F, Demirci M, Kaya YZ. Yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak buharlaşma miktarı tahmini, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2018, 9(1), 543-551.
- [33] Üneş F, Doğan S, Taşar B, Kaya YZ, Demirci M. The evaluation and comparison of daily reference evapotranspiration with ANN and empirical methods, *Natural and Engineering Sciences*, 2018, 3(3), 54-64.
- [34] Dayan F, Demirci M, Üneş F, Taşar B. Nehirlerdeki katı madde miktarının Bulanık SMGRGT yöntemi ile tahmini, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2021, 24(4), 294-307.
- [35] Er EE, Unes F, Taşar B. Estimating Dam Reservoir Level Change of Istanbul Alibey Dam with The Fuzzy SMGRGT Method, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2022, 5(Özel Sayı), 80-95.
- [36] Saplıoğlu K, Acar R. K-means kümeleme algoritması kullanılarak oluşturulan yapay zeka modelleri ile sediment taşınımının tespiti, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2020, 9(1), 306-322.
- [37] Demirci M. Kıyıya Dik Profil Değişimlerinin Deneysel İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2006.
- [38] Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and control*, 1965, 8(3), 338-353.
- [39] Toprak ZF, Toprak A, Aykaç Z. Bulanık SMGRGT yönteminin pratik uygulamaları, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2017, 8(1), 123-132.
- [40] Jang JS, Sun CT. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems, *IEEE transactions on Neural Networks*, 1993, 4(1), 156-159.
- [41] Kocabaş H, Üneş F, Taşar B, Cansız ÖF. Türkiye Karayollarındaki Karbondioksit Emisyonunun Yapay Zekâ Yöntemleri ile Tahmini, *Türkiye Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 2023, 4(2), 82-101.
- [42] Smola AJ, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression, *Statistics and computing*, 2004, 14, 199-222.
- [43] Shevade SK, Keerthi SS, Bhattacharyya C, Murthy KRK. Improvements to the SMO algorithm for SVM regression, *IEEE transactions on neural networks*, 2000, 11(5), 1188-1193.



## Tarımsal Alanlardaki Yapılaşma Baskısını Azaltmak: Deliktaş Köyü Örneğinde Köy Gelişme Alanı ve İmar Uygulamaları

Aziz SARAÇOĞLU\*

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> asaracoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 27/02/2024;

Kabul/Accepted: 03/09/2024)

**Öz:** Köy gelişme alanları, genellikle kırsal bölgelerde bulunan ve planlı bir büyüme ve genişleme hedeflenen belirli alanları tanımlar. Bu kavram, kontrolsüz yapılaşmanın önlenmesi, köylerin sürdürülebilir büyümesi ve yerleşim alanlarının planlı bir düzen içinde genişlemesi amacıyla kullanılır. Genellikle yerel yönetim ve planlama kurumları tarafından belirlenen stratejiler ve imar uygulamaları çerçevesinde planlanan köy gelişme alanları, tarım arazilerinin korunması, çevresel sürdürülebilirlik, altyapı geliştirmesi ve konut ihtiyaçlarının karşılanması gibi faktörlere odaklanır. Hazine arazilerinde gerçekleştirilen köy gelişme alanı ve imar uygulamaları, tarım arazilerindeki yapılaşma baskısını azaltarak planlı kırsal yerleşim birimlerinin oluşturulmasını hedefler. Bu planlamalar, kırsal bölgelerdeki yerleşim alanlarının organik bir büyümesini teşvik ederken aynı zamanda tarım arazilerini koruma amacını taşır. Köy gelişme alanları ve bu alanlara yönelik imar uygulamaları, köylerin nüfus artışına, ekonomik gelişmeye ve çeşitli ihtiyaçlara uygun bir şekilde genişlemesini sağlamayı amaçlar. Bu çalışmada, Elazığ ili Baskil ilçesi Deliktaş köyünde yer alan 103 ada 12 parsel numarasına sahip tarıma elverişli olmayan hazine arazisinin bölgede yaşayan köy halkına tahsisi planlaması yapılmıştır. Köy gelişme alanı tahsisi uygulaması ile tahsis sonrasında, köy halkına sürdürülebilir yerleşim, tarım arazilerini koruma, konut ihtiyacının karşılanması, ekonomik gelişim, toplumsal hizmetlere erişim ve doğal kaynakların korunması gibi bir dizi fayda sunarak kırsal toplulukların kalkınmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Köy gelişme alanı uygulamasının Türkiye genelinde daha yaygın bir şekilde benimsenmesi, kırsal bölgelerdeki tarım arazilerinin sürdürülebilir bir biçimde korunmasına önemli ölçüde destek olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Köy gelişme alanı, arazi toplulaştırma, tarım toprakları.

## Reducing Urbanization Pressure on Agricultural Lands: Village Development Area and Zoning Practices in the Example of Deliktaş Village

**Abstract:** Village development areas define specific areas, usually located in rural areas, where planned growth and expansion is targeted. This concept is used to prevent uncontrolled construction, sustainable growth of villages and expansion of settlements in a planned manner. Village development areas, which are usually planned within the framework of strategies and zoning practices determined by local governments and planning institutions, focus on factors such as the protection of agricultural land, environmental sustainability, infrastructure development and meeting housing needs. Village development areas and zoning practices carried out on public lands aim to create planned rural settlements by reducing the construction pressure on agricultural lands. These plans encourage the organic growth of settlements in rural areas while at the same time protecting agricultural land. Village development areas and zoning applications for these areas aim to ensure the expansion of villages in accordance with population growth, economic development and various needs. In this study, the planning of the allocation of the public land, which is not suitable for agriculture, with the number 103 block 12 parcel number, located in Deliktaş village in Baskil district of Elazığ province, to the village people living in the region was made. It is considered that village development area allocation will contribute significantly to the development of rural communities by providing a range of benefits such as sustainable settlement, protection of agricultural lands, fulfilment of housing needs, economic development, access to social services and protection of natural resources. More widespread adoption of the village development area practice across Turkey will significantly support the sustainable protection of agricultural land in rural areas.

**Key words:** Village development area, land consolidation, agricultural lands.

### 1. Giriş

Tarımsal alanlarda yapılaşma baskısı ve köy gelişme alanı uygulamaları, kırsal alanların sürdürülebilirliği ve tarım arazilerinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Hızla artan kentleşme ve nüfus artışı, tarım arazilerinin yapılaşma baskısı altında kalmasına neden olurken, bu durum tarımsal üretimi ve gıda güvenliğini tehdit etmektedir. Bu çalışmada, Deliktaş Köyü örneğinde, tarımsal alanlardaki yapılaşma baskısını azaltmak amacıyla köy gelişme alanı ve imar uygulamaları ele alınmıştır.

\* Sorumlu yazar: [asaracoglu@firat.edu.tr](mailto:asaracoglu@firat.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-3781-3964



### 1.1. Tarımsal Alanlarda Yapılaşma Baskıları

Geçmişten günümüze, insan yaşamı için hayati öneme sahip besin maddeleri, tarımsal faaliyetler sonucunda elde edilmektedir. Bu besin maddelerinin üretiminde başvurulan temel kaynaklardan biri, hatta en önemlisi topraktır. Zamanla oluşan fakat yanlış kullanım sonucunda kolayca bozulan, bozulduktan sonra geri kazanılması veya eski durumuna getirilmesi binlerce yıl süren toprak, insan yaşamı için vazgeçilmez olmakla birlikte, kısıtlı bir kaynaktır ve dikkatlice yönetilmesi gereken önemli bir varlıktır [1-3]. Arazi kullanımı, insanlık için hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli bir konudur. Tarım, yerleşim alanları, endüstriyel tesisler ve doğal koruma alanları gibi çeşitli amaçlarla kullanılan araziler, toplumların gelişimini doğrudan etkiler. Doğru planlanmış arazi kullanımı, kaynakların etkin kullanımını sağlar ve çevresel sürdürülebilirliği destekler. Ancak plansız veya kontrolsüz arazi kullanımı, erozyon, habitat kaybı ve doğal kaynakların tükenmesi gibi ciddi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, arazi kullanımı politikaları ve planlaması, dengeli bir şekilde ekonomik büyümeyi, çevre korumasını ve toplumsal refahı destekleyecek şekilde düzenlenmelidir [4-7].

Son yıllarda Covid-19 pandemisi ve değişen iklim koşulları, akademik çevrelerde "gıda krizi" endişesinin artmasına neden olmuştur. Bu gelişmeler, tarımda kendi kendine yeterliliğin önemini bir kez daha vurgulayarak, tarım arazilerinin korunmasının hayati bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Bu durumu göz önünde bulunduran ABD, Fransa ve Çin gibi ülkeler, verimli tarım arazisi kaynaklarının henüz sınıra ulaşmadığı Afrika ülkelerinden tarım arazisi kiralamaya başlamışlardır. Türkiye de bu çerçevede Sudan ve Nijer ile tarım arazisi kiralama anlaşmaları yapmıştır. Bu kapsamda, Türkiye, Sudan'dan 780.500 hektar (ha) ve Nijer'den 1 milyon hektar tarım arazisini 99 yıllığına kiralamıştır. Günümüzde, kiralanan toplam arazi miktarı, Türkiye'nin toplam toprak alanının üç katına ulaşmış durumdadır [8].

Tarım arazilerinin doğru kullanımı, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Verimli tarım alanlarının yapılaşmaya açılması, bu değerli kaynakların kalıcı olarak kaybına yol açmaktadır [9]. Tarım arazilerinin amacına uygun olmayan şekillerde kullanılması, bu alanların insan veya hayvan beslenmesi için gerekli tarımsal faaliyetler dışında kullanılması anlamına gelmektedir. Tarım arazileri genellikle belirli özellikleri nedeniyle kentsel amaçlar için en kolay gözden çıkarılan alanlar arasında yer almaktadır [10]. Türkiye'de tarım arazilerinin amacı dışında kullanılmasının başlıca sebepleri, hızla artan kentleşme, sanayileşme, turizm gelişimi, kamu yatırımları, doğal kaynak çıkarımı ve ekonomik önceliklerin değişmesiyle tarım alanlarının kentsel veya sanayi kullanımına açılmasıdır. [11], [12].

Ulusal ve uluslararası literatürde, tarım arazilerinin amacı dışında kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. [13] gerçekleştirdikleri çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri'nin batı bölgesinde yaşanan hızlı kentleşmenin tarım arazileri üzerinde ciddi olumsuz etkileri olduğunu ortaya koymuşlardır. ABD'nin batı eyaletlerinden Utah'da yapılan ve 1986 ile 2015 yılları arasında kapsayan bu araştırma, hızlı kentleşmenin tarım arazilerinin kullanım şekillerini değiştirerek önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Araştırma sonuçlarına göre, yeni kentsel alanların neredeyse yarısı tarım arazilerinin dönüştürülmesi yoluyla elde edilmiştir. ABD'de yapılan bir başka araştırma [14], hızlı kentleşmenin tarım arazileri ve akarsu ekosistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini benzer şekilde ortaya koymaktadır. 1970-1990 yılları arasında kapsayan dönemde, ABD'nin Wisconsin eyaletinin güneydoğusunda, 47 küçük nehir ve çevresindeki arazi kullanımı ile balık topluluğu verilerini karşılaştıran bir araştırma, yoğun tarım yapılan bir bölgede artan kentleşmenin akarsu balıkları üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Araştırma sonuçları, 1970 ile 1990 yılları arasında balık türü sayısında %15, balık yoğunluğunda %41 azalma olduğunu; tarımsal arazilerin oranının %54'ten %43'e düştüğünü ve kentsel arazilerin oranının %24'ten %31'e yükseldiğini göstermektedir. Ayrıca, birim alan bazında, kentleşmenin akarsu ekosistemlerine tarım uygulamalarından daha fazla zarar verdiği de bu araştırmanın önemli bulguları arasında yer almaktadır.

Türkiye'de Çanakkale ilinde yapılan çalışmada [15], uydu verilerini kullanarak kentleşme oranlarını ve tarım alanlarının değişimini incelenmiş, bulgularıyla kent alanlarının genişlemesinin tarım arazileri üzerindeki olumsuz etkilerini açıkça ortaya konulmuştur. Özellikle hızla büyüyen kentlerin, tarım alanlarını yapılaşma için dönüştürdüğü ve bu durumun tarım sektöründe olumsuz sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Türkiye'nin en büyük şehri olan İstanbul için de benzer bir durum geçerlidir. Plansız kentleşmenin somut bir örneği olarak İstanbul, aşırı nüfus yoğunluğuyla kentleşme sorununu daha da karmaşık hale getirirken, aynı zamanda ormanlar ve tarım alanları gibi doğal alanlara ciddi zarar vermektedir. Nüfusun hızla artması ve kontrolsüz kentleşme, İstanbul'da yeşil alanların azalmasına ve tarım alanlarının yapılaşmaya açılmasına neden olmaktadır. Bu durum, hem doğal ekosistemleri tehdit etmekte hem de sürdürülebilir şehir planlaması açısından ciddi zorluklar yaratmaktadır [16]. Başkent Ankara'da da benzer bir sorun yaşanmaktadır. Cumhuriyetin kuruluşundan bu yana geçen 90 yıllık süreçte, Ankara sadece verimli tarım topraklarını değil, aynı zamanda vadiler, dereler, bağlar ve tarihi çevre gibi değerli alanlarını da kaybetmiştir. Kentleşme baskısı, Ankara'nın doğal ve tarihi yapısında önemli değişikliklere yol açmış, bu da hem çevresel hem de kültürel miras açısından olumsuz sonuçlar doğurmuştur. Şehirdeki kontrolsüz büyüme, verimli tarım arazilerinin yapılaşmaya açılmasına ve doğal alanların tahrip edilmesine neden olmuştur [17]. Tarım arazilerinin amacına uygun olmayan şekillerde kullanılmasının olumsuz etkisi, Vietnam'da

yapılan bir araştırmayla da ortaya konmuştur [18]. Thua Thien Hue ilindeki Huong Thuy beldesinde pirinç tarım arazilerine sahip 50 hane halkıyla yapılan görüşme, gözlem ve uygulanan anket verileri, kentleşmenin pirinç ekim alanlarında son 20 yılda %50 oranında bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, hayvancılık neredeyse tamamen ortadan kalkmış, kırsal alanlar hızla kentsel alanlara dönüştürülmüş ve insanların geçim kaynakları giderek tarım dışı sektörlere kaymıştır. Bu bulgular, kentleşmenin yalnızca tarım arazilerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda tarım temelli yaşam tarzını da önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir.

Farklı ülkelerde yapılan çalışmalardan anlaşılacağı üzere, kontrolsüz ve hızlı kentleşmenin tarım arazilerini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Verimli toprakların hızla kentsel alanlara dönüştürülmesi, gıda üretimi üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Nüfus artışının da katkıda bulunduğu bu eğilim, kontrol altına alınmazsa gelecekte gıda güvenliği konusunda ciddi riskler ortaya çıkarabilir. Bugün bile yetersiz beslenme ve açlık nedeniyle sorun yaşayan toplumların olduğunu düşünürsek, ülkelerin ortak hareket ederek ihtiyacı olan bölgelere destek vermesi ve tarımsal sürdürülebilirliği teşvik etmesi kritik hale gelmiştir. Tarım alanlarının korunması ve sürdürülebilir tarım politikalarının uygulanması, küresel gıda güvenliği için hayati öneme sahiptir. Uluslararası iş birliği ve sürdürülebilir kentleşme yaklaşımları, gelecekte daha güvenli bir dünya için kaçınılmaz bir gereksinimdir.

## 1.2. Köy Gelişme Alanı Uygulaması

Köy gelişme alanı uygulaması, genellikle kırsal alanlarda yerleşim düzeni ve planlamasını yönetmek için yapılan bir düzenleme sürecini ifade etmektedir. Bu uygulama, genellikle yerel yönetimler veya ilgili devlet kurumları tarafından yürütülmektedir. Köy gelişme alanı uygulamasının amacı, kırsal alanlarda yaşayan insanların ihtiyaçlarını karşılayacak uygun yerleşim alanlarını belirlemek, geliştirmek ve düzenlemektir. Bu süreçte, arazinin kullanımı, altyapı ihtiyaçları, çevre koruma, tarım alanlarının korunması gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır [19], [20].

Hazine arazilerinde gerçekleştirilen köy gelişme alanı ve imar uygulamaları, tarım arazilerindeki yapılaşma baskısını azaltmak ve planlı kırsal yerleşim birimlerini oluşturmak için bir stratejidir. Bu yöntemle, köylerin genişleme alanları belirlenmekte ve planlı bir şekilde gelişmeleri sağlanmaktadır. Böylece, köy sakinlerinin konut ihtiyaçlarını karşılayabilecekleri alanlar oluşturulurken, tarımsal niteliği düşük alanlarda arsa üretilmekte ve tarım arazilerinin korunması sağlanmaktadır. Bu uygulamanın Türkiye genelinde yaygınlaştırılması, kırsal alanlardaki tarım arazilerinin korunmasına önemli katkılar sunmaktadır. Köy gelişme alanı tespit çalışmaları, başlangıçta köyün mevcut ve gelecekteki 20 yıl içindeki konut, yeşil alan, sosyal, kültürel ve eğitim ihtiyaçlarının hesaplanmasıyla başlamaktadır. İlk olarak tarımsal niteliği olmayan hazine arazisi belirlenir. Ardından, bu alanın tarımsal, jeolojik ve topoğrafik yönden yerleşime uygunluğu incelenir ve bu alan üzerinde imar planı hazırlanıp uygulanarak plansız ve çarpık yerleşimlerin ortaya çıkması önlenir [21].

Köy gelişme alanı tahsisi uygulamasının köy halkına bir dizi fayda sağlamaktadır.

*Sürdürülebilir Yerleşim ve Altyapı İmkanları:* Köy gelişme alanları, planlı bir şekilde belirlendiğinden, köy halkına sürdürülebilir ve düzenli bir yerleşim sunmaktadır. Altyapı imkanları, su temini, enerji, yol ve diğer hizmetlerle birlikte geliştirilir, bu da köyün genel yaşam kalitesini artırmaktadır.

*Doğal Afetlere Karşı Koruma:* Mevcut yerleşim yerinin doğal afetlere karşı risk taşıdığı durumlarda, genişleme stratejilerinin gözden geçirilmesi ve bu yerleşimlerin genişlemesinin durdurularak yapılaşmanın doğal afetlere daha dirençli bir alana yönlendirilmesi önem arz etmektedir.

*Tarım Arazisi Koruma:* Bu uygulama, tarım arazilerini koruma amacı taşımaktadır. Planlı yerleşim alanları, tarım alanlarının kontrolsüz bir şekilde yapılaşmaya maruz kalmadan korunmasını sağlamaktadır. Bu da tarım faaliyetlerini sürdürülebilir kılar ve köylülerin geçim kaynaklarını güvence altına almaktadır.

*Konut İhtiyaçlarının Karşıllanması:* Köy gelişme alanları, köy halkının konut ihtiyaçlarını planlı bir yaklaşımla karşılamaktadır. Bu düzenleme, köy sakinlerinin sağlıklı ve güvenli konutlarda yaşamasını sağlamaktadır.

*Ekonomik Gelişim:* Planlı köy gelişme alanları, köy ekonomisini çeşitlendirme potansiyeline sahiptir. Ticaret, turizm veya küçük işletmeler gibi farklı sektörler için uygun ortam sunarak ekonomik büyümeyi teşvik edebilirler.

*Toplumsal Hizmetlere Erişim:* Planlı köy gelişme alanları, köy halkının temel toplumsal hizmetlere erişimini kolaylaştırmaktadır. Sağlık merkezleri, eğitim kurumları ve diğer kamu hizmetlerinin köy gelişme alanlarına daha

yakın konumlandırılması, köy sakinlerinin bu hizmetlere erişimini kolaylaştırmakta ve yaşam kalitesini artırmaktadır.

*Doğal Kaynakların Korunması:* Planlı köy gelişme alanları, çevresel sürdürülebilirliği destekleyerek doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu tür yaklaşımlar, köylerin hem ekonomik hem de ekolojik olarak sürdürülebilir olmasına yardımcı olmaktadır.

Genel olarak, köy gelişme alanı tahsisi uygulaması sonucunda, köy halkına daha iyi yaşam koşulları, ekonomik fırsatlar ve çevresel sürdürülebilirlik sağlayarak kırsal toplulukların kalkınmasına katkıda bulunmaktadır [22], [23]. Konya, Karaman ve Nevşehir illerinde köy gelişme alanı uygulamaları kapsamında yapılan çalışmalara birkaç örnek aşağıdaki gibidir [3], [24].

Birincisi, Konya'nın Karatay İlçesi'ne bağlı Katrancı Köyü'nde yapılan nüfus projeksiyonuna göre, gelecek 20 yıl içinde 136 aile için konut gereksinimi olacağı tahmin edilerek köy gelişme alanı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Köyde gerçekleştirilen köy gelişme alanı tespit çalışmaları, köy konağı, kooperatif tesisi, spor sahası, halk eğitim merkezi, ticari tesis ve hayvan pazarı gibi çeşitli yapılar ve tesisler için ihtiyacın olduğu gözlenmiştir. Bu tespit üzerine, köyün hem mevcut hem de gelecekteki sosyal, kültürel ve eğitimsel ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla köy gelişme alanı, mevcut köy yerleşim yerinin sınırları içinde yer alan hazine arazisi olarak belirlenmiştir. İmar planı çalışmaları sonucu, köyde 122 konut parseli, sosyo-kültürel tesisler, sağlık merkezi, eğitim tesisi, yönetim ofisleri, ibadet alanı, köy konağı, kooperatif ve ticaret alanları için yer tahsis edilmiştir. Böylece köy gelişme alanı çalışmaları, hem köyde düzenli bir büyümeyi teşvik etmiş hem de gelecek 20 yıl boyunca köyün barınma ve sosyal tesis ihtiyaçlarının %90'ını karşılayacak altyapıyı oluşturmuştur.

İkincisi, Nevşehir İli Derinkuyu İlçesi Kuyulutatlar Köyü'nde yapılan köy gelişme alanı tespit çalışmalarında, 20 yıllık nüfus projeksiyonuna göre nüfusun azalacağı öngörülmüştür. Ancak köy muhtarı ve köy halkı ile yapılan görüşmelerde, mevsimsel yağışların köydeki konutlarda sel baskınlarına yol açtığı ve köyde yeni konut inşa etmek için yeterli alan olmadığı için yeni bir yerleşim yerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle köyde konut ihtiyacı olduğundan dolayı, mevcut köy yerleşim yerinin kuzeydoğusundaki hazine arazisi köy gelişme alanı olarak belirlenmiştir. Bu sayede, sel riski taşıyan mevcut köy yerleşim bölgesinde yapılaşma durdurulmuş ve daha güvenli olan kuzeydoğu bölgesine doğru yapılaşma yönlendirilmiştir.

Üçüncüsü, Karaman İli Merkez İlçesi Madenşehir Köyü'nde, arazi toplulaştırma projesiyle mevcut köy yerleşimi sit alanı ilan edilmiştir. Köyün hem şimdiki hem de gelecekteki konut ihtiyacını karşılamak amacıyla, mevcut köy yerleşim alanının kuzeyinde yer alan hazine arazisi köy gelişme alanı olarak belirlenmiştir. Bu gelişme alanı, köyde yaşanan konut arsası kıtlığını gidermek için imar planı projesiyle birlikte uygulanmıştır. Bu sayede köyde ihtiyaç duyulan tesisler ve konut alanları, arazi toplulaştırma projesinin de desteğiyle çözülmüştür.

Literatürde yer alan sınırlı sayıda çalışmalardan yola çıkarak bu çalışmada, Elazığ iline bağlı Baskil ilçesinde yer alan Deliktaş köyünde bulunan 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisinin köy gelişme alanı uygulaması ve imar planlaması gerçekleştirilmiştir. Bu planlama ile mevcut köyde düzenli yapılaşmayı sağlamak, tarım arazilerine yönelik işgalleri önlemek, vatandaşların konut ve sosyal-kültürel tesis ihtiyaçlarını geleceğe yönelik olarak karşılamak amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, çalışmada köy gelişme alanı olarak belirlenen hazine arazisinde iskân planlaması sunularak, köyde yaşayan bireylerin konut ihtiyaçlarını tarım arazilerini bölmeden çözüme kavuşturmak hedeflenmektedir.

Köy gelişme alanı uygulamaları, mevzuatta 3083 Sayılı Sulama Alanlarında Arazi Düzenlenmesine Dair Tarım Reformu Kanunu ve 5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu ile düzenlenmiş olup, kırsal alanlarda planlı ve sürdürülebilir bir kalkınma modeli oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kanun kapsamında Sulama Alanlarında Arazi Düzenlenmesine Dair Tarım Reformu Kanunu Uygulama Yönetmeliği'nin 41. maddesi Köy Gelişme ve Yeni Köy Yerleşme Yerleri Yer Seçimi; "Uygulama bölgesinde, Bölge Müdürlüğüne yapılan çalışmalara göre, Genel Müdürlükçe uygun görülen yerlerde, köy gelişme ve yeni köy yerleşme yerleri seçilir. Seçilen yeni köy yerleşme yerlerinin kurulması veya mevcut köyler ile köy altı yerleşme birimlerinin birleştirilmesi ilgili kuruluşların da görüşü alınarak Bakanlığın teklifi ve Bakanlar Kurulunun Kararı ile olur. Tarım Reformu uygulama alanlarında köy gelişme ve yeni köy yerleşme yerlerinin altyapı hizmetlerini Tarım Reformu Genel Müdürlüğü yapar veya yaptırır" hüküm altına alınmıştır [25]. Bu uygulamalar, tarım arazilerinin korunması, köylerin altyapısının iyileştirilmesi, konut ihtiyacının karşılanması ve ekonomik kalkınmanın teşvik edilmesi gibi birçok fayda sunmaktadır.

## 2. Uygulama

### 2.1. Köy Yerleşme Planı İş Akışı

Köy yerleşme planı iş akışı aşağıda verilmiştir.

**Köy Yerleşme Planı Talebi:** Köy yerleşim planının oluşturulması, muhtarlığın isteğiyle veya valiliğin kendi inisiyatifiyle gerçekleştirilebilir. Muhtar, köy heyetinin onayını aldıktan sonra bu talebi iletebilir, ancak valilik kendi başına da plan yapma yetkisine sahiptir. Muhtarlığın talebi, bulunduğu yerin mülki idare amirine iletilmelidir; merkez ilçelerde bu amir vali, diğer ilçelerde ise kaymakamdır. Valilik tarafından yapılan planlarda köy heyetinin onayı gerekmez. Bu çalışmada Deliktaş Köyü Muhtarı'nın köy heyetinin onayını aldıktan sonra talebini kaymakamlığa ileterek gerçekleştirmiştir.

**Köy Yerleşme Planı Tespit Komisyonu ve Görevlendirilmesi:** Valilik, köy yerleşme planı hazırlamayı düşündüğünde veya muhtarlığın yaptığı talep kaymakamlık tarafından uygun görülüp valilik tarafından onaylandığında, vali köy yerleşme alanı tespit komisyonunu görevlendirir. Köy yerleşme alanı tespit komisyonu, vali yardımcısının başkanlığında oluşturulur ve üyeler millî emlak, bayındırlık ve iskan, tarım, köy hizmetleri ve kadastro müdürlüklerinden birer teknik eleman ile köy temsilcisinden oluşur. İhtiyaç duyulursa, komisyona diğer ilgili kuruluşlardan da uzmanlar dahil edilebilir. Komisyon, toplam üye sayısının üçte iki çoğunluğu ile toplanır ve kararları salt çoğunluk ile alır. Oyların eşit çıkması durumunda, başkanın oy verdiği taraf çoğunluğu sağlar ve bu yönde karar alınır.

**Köy Yerleşme Alanının Tespiti Esasları:** Komisyon, ilk adım olarak köyün haritalarını, sosyal ve ekonomik durumunu gösteren belgeleri ve diğer gerekli bilgileri toplar ve merkezde ön değerlendirme yapar. Bu ön değerlendirmeden sonra komisyon üyeleri, köyün planlama alanına giderek sahada incelemelerde bulunur. Bu incelemelerde köyün gelecekteki büyüme ihtiyacını dikkate alarak, gerekli konut parsel sayısını, bu parsellerin büyüklüklerini, ayrıca sosyal tesisler ve diğer kamu ihtiyaçları için gerekli arazi miktarını hesaplar ve köy yerleşme alanının boyutlarını belirler. Komisyon, yeni yerleşme alanını mevcut köy yerleşik alanıyla uyumlu olacak şekilde ve mümkün olduğunca mera niteliğini kaybetmiş ya da verimliliği düşük tarım arazileri ile tarım dışı hazine arazileri üzerinde oluşturmaya çalışır. Böylelikle köy gelişme alanı için en uygun arazilerin sınırlarını belirler. Eğer çok sayıda talep varsa, komisyon nüfusu en yüksek olan köylerden başlayarak bir öncelik sıralaması yapar ve çalışmalarını buna göre düzenler. Bu amaçla, gerekirse valilik birden fazla komisyon oluşturabilir; bu komisyonlar, aynı vali yardımcısının başkanlığında da olabilir. Komisyon, yaptığı tüm çalışmalarını ve aldığı kararları bir tutanak ile belgeler. Bu çalışmada bölgede tarıma elverişsiz hazine arazisi bulunmasından dolayı hazine arazisi kullanılmıştır. Uygulama alanı ile ilgili detaylar uygulama alanı başlığı altında açıklanacaktır.

**Köy Yerleşme Planının Oluşturulması:** Komisyon, tespit ettiği verileri ve aldığı kararları köy yerleşme planının yapılması için il özel idaresine iletir. İl özel idaresi, komisyon tarafından belirlenen köy yerleşme alanı sınırlarını, sabit noktalar arasında düz çizgiler çekerek sahada işaretler ve köşe noktalarını kalıcı işaretlerle belirler. Ardından, tespit edilen bu alan kadastro işlemine tabi olan yerlerde 1/1.000 ölçekli bir harita üzerine kaydedilir. Kadastro işleminden geçmemiş bölgelerde ise, bu alanın 1/1.000 ölçekli haritası veya ölçekli krokisi hazırlanır ya da hazırlatılır. Belirlenen harita veya kroki üzerinde, Devletin hüküm ve tasarrufu altında olan mera, yaylak, seyrangah, yol, harman ve panayır yerleri gibi alanlar ve Hazinesinin mülkiyetinde olup bir kamu hizmetine tahsis edilmemiş yerler dışındaki özel mülkiyete ait veya olabilecek taşınmazlar tespit edilir. Bu taşınmazlar, köy tüzel kişiliği tarafından kamulaştırılır ya da uygulama dışı bırakılır. İl özel idaresi, hazırlanan harita veya kroki üzerinde, teknik kurallara uygun olarak, komisyon tarafından tespit edilen sosyal tesisler, konut alanları ve köyün diğer ihtiyaçlarına göre gerekli parsel ve yolları ölçek dahilinde düzenler. Daha sonra, köy yerleşme planını zemine aplike ederek, parsel köşe noktalarını işaretler. Bu uygulama, köy gelişme planının teknik olarak doğru ve uygulanabilir olmasını sağlar.

**Köy Yerleşme Planlarının Onayı:** Hazırlanan köy yerleşme planları, valinin onayıyla resmîyet kazanır ve yürürlüğe girer. Onay sürecinden sonra, plan köy muhtarlığına tebliğ edilir. Bu tebliğ, planın köy muhtarlığı tarafından kabul edilmesi ve uygulanmasına ilişkin sürecin başlangıcını işaret eder. Bu şekilde, köy yerleşme planının vali tarafından onaylanmasıyla birlikte, planın köy yönetimi ve köy halkı tarafından uygulanabilirliği sağlanmış olur.

### 2.2. Uygulama Alanı

Elazığ iline bağlı Deliktaş köyü, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır. Baskil ilçesine bağlı olan köy, il merkezine yaklaşık 70 kilometre uzaklıktadır. Köyün nüfusu 215 kişi olup bir önceki yıla göre artış oranı %3.37'dir. Coğrafi olarak Fırat Nehri'nin kıyısında bulunan Deliktaş köyü, verimli tarım arazileriyle çevrili bir konumdadır. Köy, tarım ve hayvancılığa dayalı bir yaşam tarzına sahip olan halkıyla dikkat çekmektedir. Köyün arazi yapısının engebeli olması, köy yerleşimlerinin istenen koşulları sağlamasını zorlaştırmaktadır. Bu

durum, yerleşim yerlerinin büyüklüklerinin yetersiz kalmasına ve insanların genellikle eski yerleşim yerlerinde dağınık bir şekilde yaşamak zorunda kalmasına neden olmuştur. Bu dağınık yerleşimler tarımsal faaliyetlerin ve diğer ekonomik faaliyetlerin planlı bir şekilde yürütülmesini engellemekte ve yerel ekonomiyi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, engebeli arazi yapısına sahip yerlerde yerleşim planlamasına ve altyapı geliştirmeye yönelik daha dikkatli ve kapsamlı yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Deliktaş köyünde yer alan, yaklaşık 15 hektar büyüklüğünde 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisi için köy gelişme alanı uygulaması planlanmıştır. Uygulama alanı olan 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisi Şekil 1'de gösterilmektedir.

Çalışmada kullanılan proje koordinat bilgisi Tablo 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan proje koordinat bilgisi.

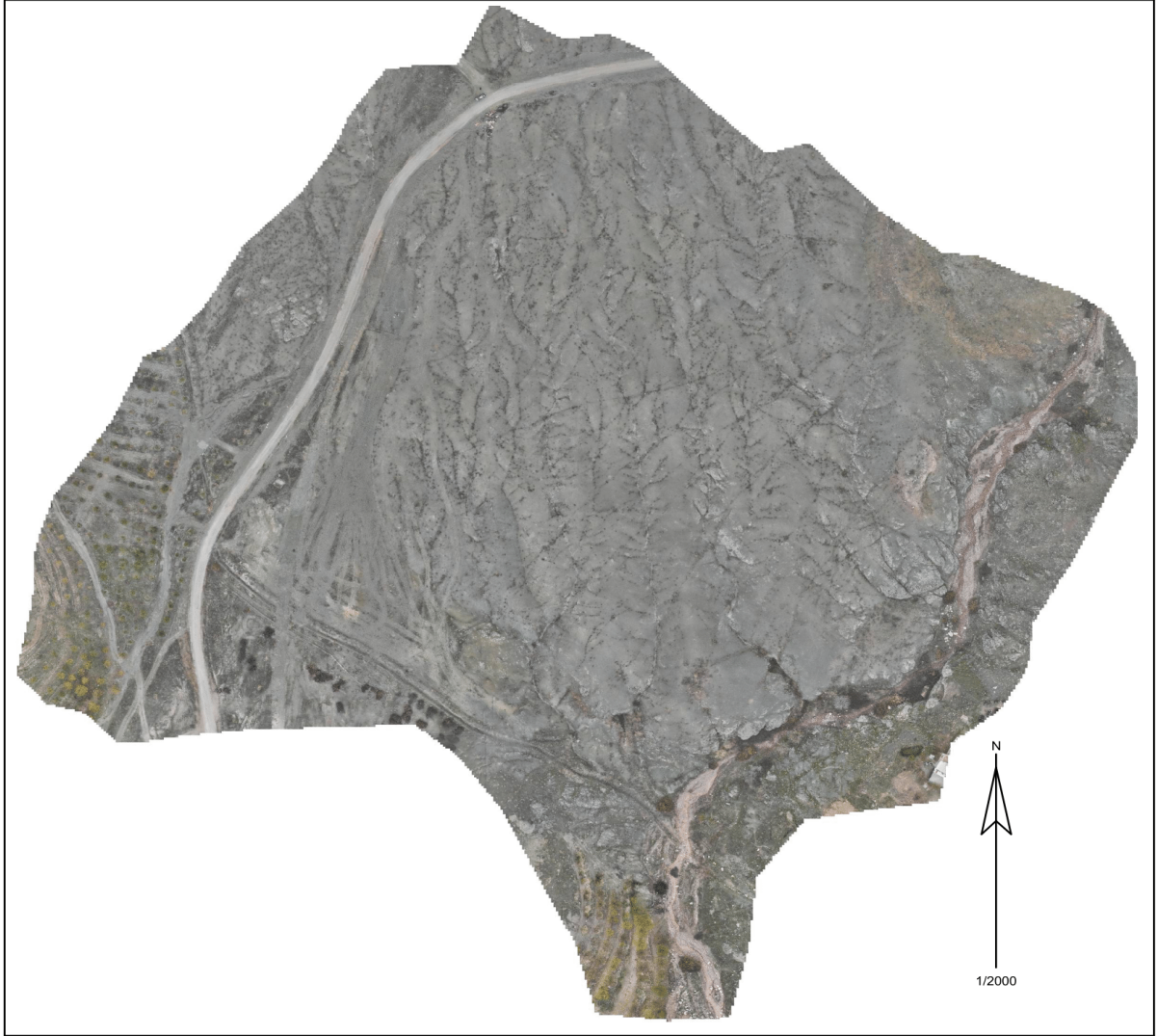
Proje Koordinat Bilgisi	
Datum	ITRF-96
Projeksiyon	UTM 3°
Elipsoid	GRS80
Dilim Orta Meridyeni	39
Dilim	39
Referans Yükseklik	Ortametrik



**Şekil 1.** Uygulama alanı olarak belirlenen 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisi.

Arazi çalışmaları kapsamında; bölgenin mevcut durumunu incelemek, imar ve parselasyon işlemlerini gerçekleştirebilmek amacıyla Elazığ'da haritacılık sektöründe faaliyet gösteren Uzay Harita Mühendislik Bürosu'ndan destek alınarak uygulama alanının halihazır haritası üretimi için sahaya gidilmiştir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte, insansız hava araçları (İHA'lar) haritacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle RTK/GPS sistemine sahip özel olarak geliştirilmiş İHA'lar, ekonomik, hızlı ve yüksek doğruluklu haritaların havadan üretilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla, DJI MAVIC 3 ENTERPRISE marka drone kullanılarak uygulama alanının 60 metre yükseklikten 300 adet fotoğrafı çekilmiştir. Ardından, bu fotoğraflar

birleştirilerek bölgenin ortofoto görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 2). Bu süreç, arazi çalışmalarının etkin bir şekilde yürütülmesine olanak tanımış ve mevcut durumun detaylı bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmuştur.



Şekil 2. Uygulama alanının ortofoto görüntüsü.

Drone ile çekilen koordinatlı fotoğrafların NetCAD yazılımı kullanılarak halihazır harita üretimi oldukça önemli ve detay gerektiren bir süreçtir. Bu süreç, birkaç temel adımdan oluşmaktadır:

**Fotoğraf Çekimi ve Veri Toplama:** Drone, belirli bir bölgeden yüksek çözünürlüklü fotoğraflar çeker. Bu fotoğrafların her biri coğrafi konumlarına göre etiketlenir ve koordinatlandırılır. Fotoğrafların örtüşme oranı, daha sonra fotoğrafların net bir şekilde birleştirilmesini sağlamak için önemlidir.

**Fotoğraf İşleme ve Harita Oluşturma:** Çekilen fotoğraflar fotogrametri yazılımları kullanılarak işlenir. Bu aşamada, fotoğraflardaki noktaların 3D konumları hesaplanır ve bir nokta bulutu oluşturulur. Nokta bulutu, arazi yüzeyinin dijital bir modelini temsil eder.

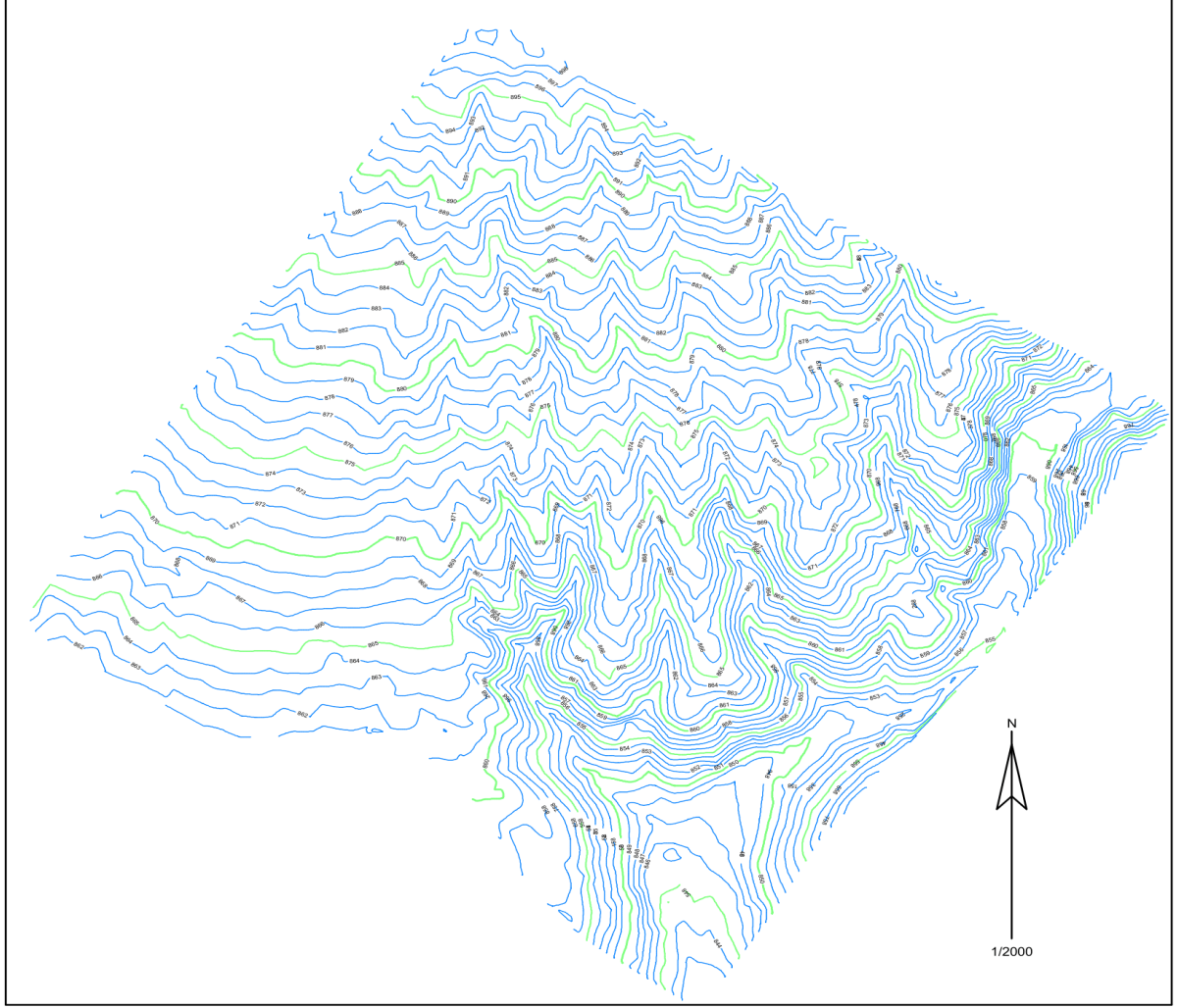
**Nokta Bulutu Verisinin İşlenmesi:** Nokta bulutu verisi NetCAD gibi harita yazılımlarına aktarılır. Bu yazılımlar, nokta bulutu verisini düzenlemek ve işlemek için kullanılır. Nokta bulutu, arazi detaylarını ve yapıları içeren 3D bir model olarak görselleştirilir.

**Harita Üretimi:** NetCAD yazılımı kullanılarak, nokta bulutu verisi üzerinde çalışılarak detaylı bir halihazır harita oluşturulur. Bu harita, arazinin topografik özelliklerini, yapılarını, yollarını ve diğer önemli detayları içerir.

**Kontrol ve Düzenleme:** Oluşturulan harita genellikle dikkatli bir şekilde incelenir ve gerektiğinde düzeltilir. Drone ile çekilen fotoğraflardan NetCAD yazılımı kullanılarak halihazır harita üretimi, modern teknolojinin ve

yazılımın entegrasyonu ile hassas ve doğru haritaların oluşturulmasını sağlar. Bu yöntem, arazi planlaması, altyapı geliştirme ve çevresel değerlendirme gibi birçok alanda kullanılabilir.

Uygulama alanı olarak belirlenen 15 hektarlık 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisinin köy yerleşim yeri planlaması, 6,40 hektarlık bir alanında titizlikle uygulanmıştır. Arazi çalışması sırasında elde edilen fotoğrafların detaylı analizi sonucunda, koordinatlı nokta bulutları elde edilmiş ve bu veriler NETCAD 8.5 yazılımına aktararak uygulama alanının halihazır haritası oluşturulmuştur (Şekil 3). Şekil 2’de sunulan ortofoto görüntüsü ve Şekil 3’te sunulan halihazır haritasının incelenmesiyle, bölgenin topografik yapısının oldukça belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Zeminin genel olarak kayalık ve eğimli olması, tarımsal faaliyetlerin bu alanda sınırlı kalacağını işaret etmektedir. Bu durum, tarımsal alanlardaki kullanım potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



**Şekil 3.** Köy gelişme alanı olarak belirlenen hazine arazisinin halihazır haritası.

Çalışma alanının halihazır haritası hazırlandıktan sonra, köy yerleşimine yönelik imar uygulaması yapılmıştır. Köylerin sürdürülebilir kalkınması, gelişim alanlarının etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi ile yakından ilişkilidir [26]. Bu bağlamda, parselasyon çalışmaları, köylerdeki arazi kullanımını düzenlemek ve verimliliği artırmak için önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Parselasyon, bir arazinin belli ölçülerde parçalara bölünerek daha verimli kullanılmasını sağlayan bir planlama ve düzenleme sürecidir. Bu süreçte, yerleşim alanları, kamusal alanlar ve diğer kullanım amaçlarına uygun olarak belirlenen parsellerde düzenlenir.

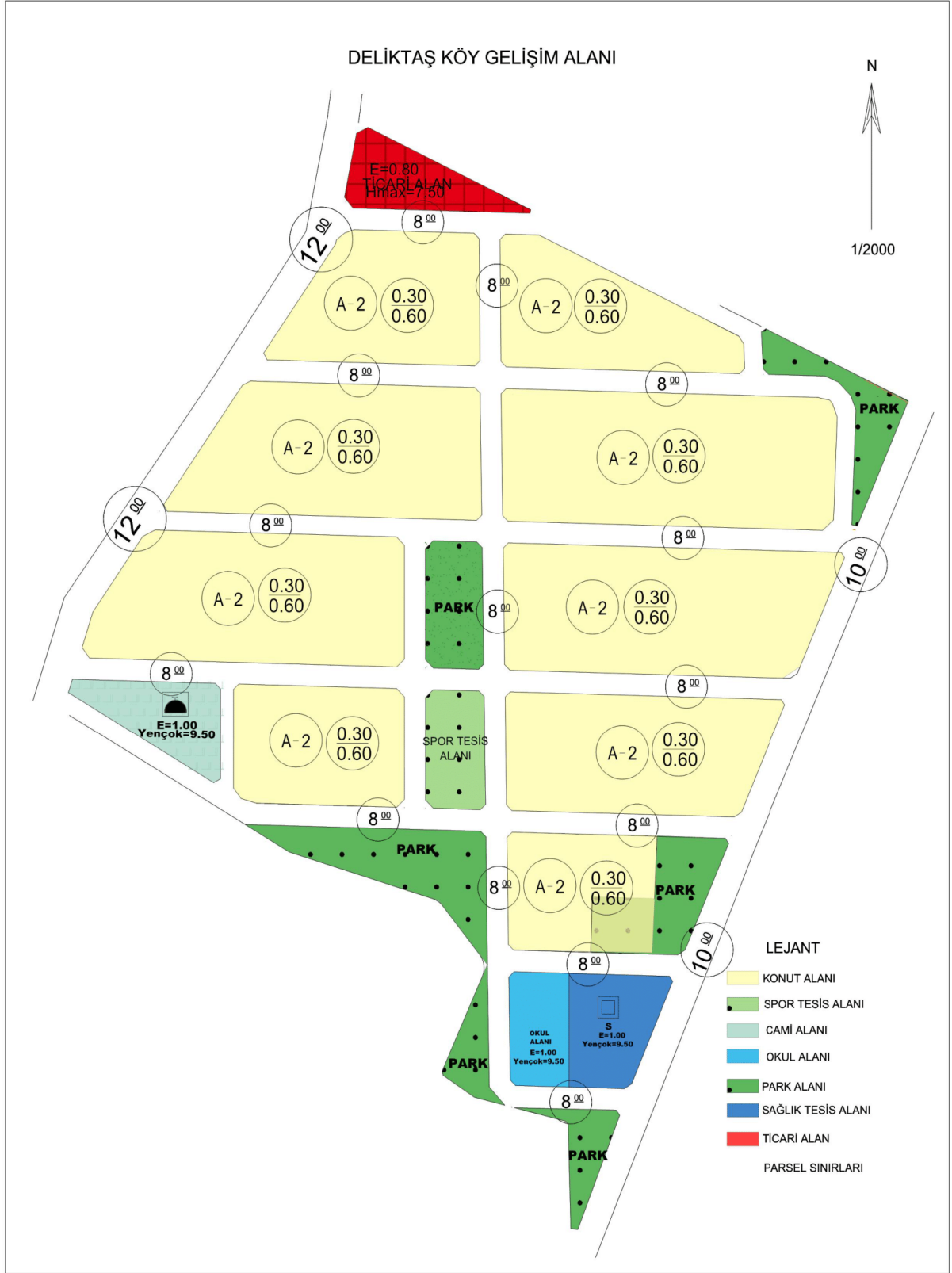
Kırsal alanlardaki yaşamsal altyapı eksiklikleri, köylerde yaşamı olumsuz etkileyerek yerel ekonomiyi zayıflatabilmektedir. Türkiye’nin toplumsal yapıyı güçlendirmesi ve planlı kalkınma yolunda ilerlemesi için, köy ve köylü sorunlarının yerinde çözülmesi gerekmektedir. Bu, insanların doğdukları yerde mutlu olmalarını

sağlamak ve kırsal bölgelerde yaşamayı tercih etmelerini teşvik etmek anlamına gelmektedir. Kırsal alanlarda yaşam standartlarını yükseltmek ve ekonomik kalkınmayı desteklemek için, her köy için yerleşim planlarının oluşturulması ve bu planlara uygun uygulamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu, köylülerin sosyal ve ekonomik açıdan kalkınmalarına katkıda bulunacak ve yaşam kalitelerini artıracaktır. Kırsal kalkınmanın temel hedefleri arasında yerleşim yeri planlaması ve uygulamasına yer verilmesi, kırsal alanlardaki yaşam koşullarının iyileştirilmesi ve köylülerin refahının artırılması için önemli bir adımdır. Bu sayede, kırsal alanlarda yaşayan insanların yaşamlarını sürdürmeleri için gerekli olan altyapı ve hizmetlere erişimleri artacak, ekonomik faaliyetlerin çeşitlenmesi ve istihdam olanaklarının artması sağlanacaktır. Bu da Türkiye'nin genel ekonomik büyümesine ve toplumsal refahın artmasına katkı sağlayacaktır. Bu hususlar dikkate alınarak; 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisinde parsellasyon yapılırken, arazinin optimal kullanımını sağlamak için çevresel ve sosyal faktörler dengeli bir şekilde göz önünde bulundurulmuştur. Köy yerleşim yeri parsellasyonu yapılırken planda aşağıdaki alanlara yer verilmesi önem arz etmektedir:

- **Yerleşim Alanları:** Konutlara ve yerleşim birimlerine ayrılmış alanlar, köy halkının yaşamını sürdürebilmesi için temel gereksinimleri karşılamak üzere tasarlanmalıdır.
- **Eğitim Alanları:** Okul alanları, ilkokul, ortaokul ve lise binaları ile öğrencilerin eğitim alabileceği uygun alanları içermelidir. Bu alanlar, köy halkının çocuklarının eğitim ihtiyaçlarını karşılamak için gereklidir.
- **Sosyal Tesisler:** Cami, ibadethane, kültürel merkez, kütüphane gibi toplumsal ihtiyaçları karşılayacak sosyal tesisler için uygun alanlar ayrılmalıdır.
- **Sağlık Hizmetleri:** Sağlık merkezi veya sağlık ocağı için ayrılmış alanlar, köy halkının sağlık hizmetlerine kolayca erişebilmesini sağlamak için önemlidir.
- **Spor Alanları:** Spor salonları, futbol sahaları, basketbol sahaları gibi spor aktiviteleri için kullanılacak alanlar köy halkının sağlığını destekleyebilir ve toplumsal etkileşimi artırabilir.
- **Yeşil Alanlar ve Parklar:** Rekreasyon ve dinlenme için yeşil alanlar, parklar ve bahçeler, köy halkının doğayla etkileşimini ve sosyal etkileşimini teşvik etmek amacıyla planda yer almalıdır.
- **Ticari alanlar:** Köy ekonomisinin canlanmasına katkıda bulunabilir, istihdam oluşturabilir ve yerel girişimcilerin iş yapma fırsatlarını artırabilir. Bu alanların düzenli ve etkili bir şekilde planlanması, ticari faaliyetlerin köyde sürdürülebilir bir şekilde gelişmesini sağlar ve köy halkının yaşam kalitesini artırır.

Yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak NETCAD 8.5 yazılımı kullanılarak uygulama alanına ait imar planı Şehir Bölge Plancısı tarafından oluşturulmuştur (Şekil 4). Köy gelişim alanı imar planlaması, köyün gelecek 20 yıl içerisindeki nüfus projeksiyonları ve köy halkının ihtiyaçları dikkate alınarak ve köy heyetinin onayı sonucunda hazırlanmıştır. İmar planına göre köy evleri, ayrıntı nizamda ve 2 katlı yapılar olarak tasarlanmıştır. Deliktaş Köyü halkının gelir kaynağı genellikle hayvancılık olduğundan, evlerin alt katlarını hayvanları için ahır olarak kullanılabilecektir. İmar planında köylülerin kendi parsellerinde yapacakları konut için Taban Alanı Kat Sayısı (TAKS) 0,30, Kat Alanı Kat Sayısı (KAKS) ise 0,60 olarak belirlenmiştir. Bu uygulamada her bir parsel yaklaşık 600 m<sup>2</sup> alan düşmektedir. 600 m<sup>2</sup>'lik alana göre parselde yapılacak yapının oturma alanı, (600 x 0,30) = 180 m<sup>2</sup>'dir. Aynı parselde yapılacak inşaatın toplam alanı (KAKS, emsal) ise (600 x 0,60) = 360 m<sup>2</sup>'dir. KAKS/TAKS oranı ise yapının kat adedini vermektedir. Buna göre KAKS 0,60; TAKS ise 0,30 olduğuna göre yapı üzerinde yapılacak yapı 0,60/0,30 = 2 kat olarak hesaplanır. Ayrıca imar yollarının genişlikleri 8, 10 ve 12 metre olarak belirlenmiştir. Hazırlanan imar planı valinin onayı ile yürürlüğe girmesinin ardından imar planındaki alanlara uygun olarak parsellasyon çalışması Harita Mühendisi tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).





Şekil 4. Köy gelişme alanı yerleşim yeri imar planı.



Şekil 5. Köy gelişim alanı yerleşim yeri parselasyon haritası.

Şekil 5'te gösterilen parselasyon haritasına göre, köy gelişme alanı olarak belirlenen 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisinde, 63 parselden oluşan yerleşim alanı tasarlanmıştır. Bu alanda, yerleşim alanları, okul, sosyal tesis, sağlık tesisi, spor alanı, yeşil alan ve ticari alanlar bulunmaktadır. Bu plana göre, parselasyon sonrasında köy yerleşim alanının dağılımı şu şekildedir: %60,18'i konut alanı, %9,65'i yeşil alan, %1,81'i ticari alan, %1,95'i ibadet alanı, %1,48'i okul alanı, %2,08'i sağlık tesisi, %1,54'ü spor tesisi ve %21,32'si yollara ayrılmıştır (Tablo 2). Köy yerleşim yeri planlanmasındaki bu oranlar köy halkının ihtiyaçlarına göre belirlenmiştir. Konut parselleri köy halkına kura yöntemiyle dağıtılmıştır.

**Tablo 2.** Parselasyon planlaması sonrasında köy yerleşim alanının parselasyon dağılımı.

<b>Nitelik</b>	<b>Alan (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Oran (%)</b>
Konut	38513,00	60,18
Yeşil Alan	6175,00	9,65
Ticari Alan	1159,00	1,81
İbadet Alanı	1248,00	1,95
Okul Alanı	949,00	1,48
Sağlık Tesisi	1328,00	2,08
Spor Tesisi	983,00	1,54
Yol Alanı	13645,00	21,32
<b>Toplam</b>	<b>64000,00</b>	<b>100,00</b>

### 3. Tartışma

Tarım arazilerinin kullanımı konusunda yapılan çalışmalar genellikle bir noktada birleşir: "Tarım arazilerinin mevcut potansiyelini en iyi şekilde kullanmak ve doğal kaynakları sürdürülebilir bir şekilde yönetmek". Türkiye'deki tarım arazilerinin karşılaştığı en büyük sorunlar arasında erozyon ve tarım dışı kullanım yer alır. Erozyon, doğal yöntemlerle kontrol altına alınabilirken, tarım dışı kullanımın azaltılması için çok yönlü bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Literatürde genellikle; arazi kullanım planlarının oluşturulması, mutlak korunması gereken tarım alanların belirlenmesi ve yasal önlemler öncelikli olarak ele alınır.

Kırsal alanda konut ihtiyacını gidermek için başvuru alan ilk yöntem, köylü halkın kendi tarım arazilerine konut inşa etmesidir. Ancak bu yöntemin, tarım arazilerinin azalmasına ve plansız yerleşimlerin ortaya çıkmasına yol açarak, çevresel ve mekânsal olumsuz sonuçları bulunmaktadır. Diğer bir yöntem ise, mevcut köy yerleşimindeki boş alanların konut yapımı için kullanılmasıdır. Ancak bu yöntemde, köy boşlukları konut talebini karşılamakta yetersiz kalabilir ve plansız yerleşimlerin oluşmasına neden olabilir. Bununla birlikte, tarım arazilerinin yapılaşmaya açılması, arazi kayıplarını önlemekte ve tarım toprağını korumaktadır. Bu yaklaşım, tarım arazilerinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini koruyarak, kırsal alanlardaki yerleşimlerin planlı bir şekilde gelişmesine olanak tanır. Bu sayede, çevresel dengenin korunması ve tarım faaliyetlerinin sürdürülebilirliği sağlanabilir.

442 Sayılı Köy Kanunu ve Köy Yerleşim Alanı Uygulama Yönetmeliği'ne göre uygulanan köy yerleşik alanı yöntemi, mevcut yerleşimin sınırından 100 metrelik bir çember çizilerek bu alana köy yerleşik alanı statüsü verilmesini öngörmektedir. Bu şekilde belirlenen alanda tarım arazilerinin korunması amaçlanmaktadır. Ancak, bu yöntemde 100 metrelik alan içinde verimli tarım arazilerinin korunmasının garantisi bulunmamaktadır. Köy yerleşik alanı uygulaması, tarım arazilerinin tamamen kaybını önleyememekte ancak planlı yerleşimlerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

Kırsal alanda konut ihtiyacını karşılamak için başvuru alan diğer bir yöntem ise bu çalışmada da uygulanan 3083 Sayılı Sulama Alanlarında Arazi Düzenlenmesine Dair Tarım Reformu Kanunu ve 5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu'na göre uygulanan köy gelişme alanıdır. Bu yaklaşımda, mevcut köyün bitişiğinde veya bütünlük sağlayacak şekilde yakın olan tarım dışı maliye arazileri üzerinde konut ihtiyacını karşılamak için imar planı sonucu arsalar oluşturulmaktadır. Köy gelişme alanı uygulamalarıyla, tarım arazileri korunmakta ve planlı kırsal yerleşimler oluşturulmaktadır. Ancak, bu yöntemin yalnızca maliye hazinelerinde uygulanabilmesi, mevcut yerleşimlerin yakınında maliye arazisi bulunmayan köylerde uygulanmasını engellemekte ve bu nedenle uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır.

Tarımsal niteliği olmayan arazilerden, mevcut ve geleceğe yönelik planlamalar yapılarak uygun büyüklükte tespit edilen köy gelişme alanları, planlı bir yerleşim modeli sunmaktadır. Bu yaklaşımla, yapılaşmanın olumsuz

etkilerini önleme amacı güden köy gelişme alanı uygulamalarının Türkiye genelinde yaygınlaştırılması, tarım arazilerinin iskan amacıyla olumsuz etkilenmesini azaltabilir. Köy gelişme alanı uygulamasının ülke genelinde geliştirilerek yaygınlaştırılmasıyla bir dizi ulusal fayda elde edilebilir. Köy gelişme alanı uygulamasının geniş kapsamlı şekilde benimsenmesiyle, tarım arazileri üzerindeki yapılaşma baskısı belirgin bir şekilde azalacaktır. Aynı zamanda, planlı kırsal yerleşimlerin kurulması, kırsal alanlardaki tarım arazilerinin korunmasına büyük katkı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, tarım topraklarının verimliliğini artırarak tarımsal üretimde istikrarlı bir gelişme sağlayacaktır. Köy gelişme alanlarının altyapısıyla birlikte tamamlanması, kırsal kesimde yaşayan insanlar için çekici bir yaşam alanı oluşturacaktır. Bu şekilde, modern altyapıya sahip olan köylerde yaşamak, kırsal kesimde yaşayan insanlar için daha cazip hale gelecektir. Gelişmiş altyapıya sahip köylerde yaşamak, insanların günlük yaşamlarını daha konforlu ve verimli hale getirecek ve kırsal göçü azaltacaktır.

Köy gelişme alanı uygulamalarının yaygınlaşması için, maliye hazine arazisi dışında kalan alanlarda da benzer uygulamaların gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, uygulamayı yapan kurumlarca belirlenen köy gelişme alanlarının varsa kamulaştırma yoluyla maliye arazisine dönüştürülmesi sağlanabilir. Bu adım, köy gelişme alanı uygulamalarının yaygınlaşması ve kırsal alandaki insanlara talep görmesine yardımcı olabilir. Köy gelişme alanı uygulamalarının sadece imar planıyla sınırlı kalmaması, aynı zamanda alt ve üst yapılarıyla da tamamlanması önemlidir. Bu şekilde, modern yaşam standartlarına uygun köylerin oluşturulması sağlanarak, kırsal kesimde yaşayan insanların yaşam kalitesinin artırılması hedeflenebilir. Ayrıca, köylerin özgün yapı özelliklerinin korunması için, üretilen yapıların yöresel mimari özelliklere uygun olması ve yerel mirasın korunması büyük önem taşır. Tarım arazileri ile mekânsal kullanımlar arasında dengenin sağlanması, bu kaynakların sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, tarım dışı kullanımlar için uygun arazilerin belirlenmesi ve korunması, aynı zamanda mutlak korunacak tarım arazilerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin Türkiye genelinde tamamlanması, tarım arazilerinin etkin bir şekilde kullanılmasını ve korunmasını sağlayacaktır.

Deliktaş köyü örneğinde gerçekleştirilen araştırma sonuçları, tarıma elverişli olmayan hazine arazisinin köy gelişme alanı uygulaması ve parselasyon çalışmalarının kırsal toplulukların kalkınmasına önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın öncelikli amacı, köy halkına çeşitli faydalar sunabilecek planlı ve sürdürülebilir bir yerleşim düzeninin oluşturulmasıdır. Önerilen köy gelişme alanı tahsis uygulamalarının, yalnızca köyde yaşayanların ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayıp aynı zamanda tarım arazilerinin korunmasına, konut ihtiyacının karşılanmasına, ekonomik gelişimin desteklenmesine, toplumsal hizmetlere erişimin artırılmasına ve doğal kaynakların korunmasına da olumlu etkiler sağlayabileceği belirlenmiştir. Bu uygulamaların diğer kırsal bölgelerde de benimsenmesi ve benzer şekilde planlanması, ülke genelinde kırsal kalkınmaya önemli katkılar sağlayabilir. Özellikle, köy yerleşim yerleri planlanırken eğitim ve sosyal tesisler, sağlık hizmetleri, spor alanları ve yeşil alanlar gibi çeşitli ihtiyaçların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ticari alanların ekonomik gelişime katkı sağlaması amacıyla belirlenmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu alanların düzenli ve etkili bir şekilde planlanması, köyde yaşayanların ihtiyaçlarını karşılayacak ve toplumsal refahlarını artıracak bir ortam sağlayabilir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Deliktaş Köyü için Köy Yerleşme Planı hazırlama süreci ve uygulama alanı olarak belirlenen 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisinde yapılan parselasyon çalışmaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

Deliktaş Köyü'nün mevcut yerleşim alanının engebeli arazi yapısı, yerleşimlerin istenen koşulları sağlamasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, yerleşim yerlerinin büyüklüklerinin yetersiz kalmasına ve insanların genellikle eski yerleşim yerlerinde dağınık bir şekilde yaşamalarına neden olmuştur. Bu dağınık yerleşimler, altyapı hizmetlerinin sağlanmasını ve toplumsal hizmetlerin etkin bir şekilde sunulmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, bu durum, tarımsal faaliyetlerin ve diğer ekonomik faaliyetlerin planlı bir şekilde yürütülmesini engellemekte ve yerel ekonomiyi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, Deliktaş Köyü için yeni bir yerleşim alanı planlanması yapılması ve bu planın uygulanması gerekmektedir. Uygulama alanı olarak belirlenen 103 ada 12 parsel numaralı hazine arazisi, köy gelişme alanı için uygun bir konumdadır. Bu arazinin engebeli olması bir dezavantaj olarak değerlendirilebilirse de modern mühendislik teknikleri ve planlama ilkeleriyle bu dezavantajın üstesinden gelinebilir. Yapılan parselasyon çalışmaları sonucunda, 63 adet parselden oluşan yerleşim alanı, okul alanı, sosyal tesis, sağlık tesisi, spor alanı, yeşil alan ve ticari alana yer verilmiştir. Köy gelişim alanı imar planlaması, köyün gelecek 20 yıl içerisindeki nüfus projeksiyonları ve köy halkının ihtiyaçları dikkate alınarak köy heyetinin onayı sonucunda hazırlanmıştır.

Köy gelişme alanı uygulamalarının başarılı olabilmesi için yerel topluluğun aktif katılımı ve yerel yönetimlerin destekleyici politikaları büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte, paydaşların görüşlerinin alınması ve karar alma süreçlerine katılımlarının sağlanması, uygulamaların daha etkili ve sürdürülebilir olmasına yardımcı

olabilir. Bununla birlikte, köy gelişme alanı uygulamalarının etkilerini değerlendirmek ve gerektiğinde düzeltici önlemler almak için düzenli izleme ve değerlendirme süreçleri kurulmalıdır. Bu süreçler, uygulamaların amacına uygun şekilde ilerleyip ilerlemediğini değerlendirmek ve gerektiğinde revize etmek için önemli bir araç olacaktır. Kırsal kalkınma politikalarının başarısı için devlet, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları ve özel sektör arasında iş birliğinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu aktörlerin bir araya gelerek ortak vizyon ve stratejiler belirlemesi, kırsal alanlardaki yaşam kalitesini artırmak için daha etkili çözümler geliştirmeye yardımcı olabilir. Sonuç olarak, köy gelişme alanı ve imar uygulamaları, kırsal alanlardaki yaşam koşullarını iyileştirmek, ekonomik fırsatları artırmak ve doğal kaynakları korumak için önemli bir araç olabilir. Ancak, bu uygulamaların başarılı olabilmesi için bütüncül bir yaklaşım benimsemek ve tüm paydaşların aktif katılımını sağlamak gerekmektedir. Bu şekilde, kırsal bölgelerde sürdürülebilir kalkınma ve toplumsal refahın artırılması hedefine daha etkili bir şekilde ulaşılabilir.

Bu sonuçlar, Deliktaş köyü örneği üzerinden köy gelişme alanı uygulamalarının kırsal alanlarda sürdürülebilir kalkınmaya ve çevresel korumaya nasıl katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu tür uygulamaların daha geniş çapta yaygınlaştırılmasıyla, Türkiye'nin kırsal alanlarında yaşayan insanların yaşam kalitesinin artırılması ve ekonomik kalkınmanın desteklenmesi hedeflenmektedir.

## Teşekkür

Arazi çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen, Elazığ'da haritacılık alanında faaliyet gösteren Uzay Harita Mühendislik Bürosu yöneticisi Harita Mühendisi Samet GÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynaklar

- [1] Yomralioglu T, McLaughlin J. Cadastre: Geo-Information Innovations in Land Administration Cham. Springer Int Pub, 2017.
- [2] Yılmaz Ö. Tarım alanlarının amaç dışı kullanımı ve Afyon örneği. Afyon Kocatepe Üniv Sos Bil Derg 2001; 3 (1), 151-164.
- [3] Akci A, Demirel MK, Becu HŞ. Tarım Arazilerindeki Yapılaşma Baskısının Azaltılmasında Köy Gelişme Alanı ve İmar Uygulamaları: İç Anadolu Bölgesi Örneği. Nevşehir Bil ve Tek Derg 2016; vol. 5, pp. 372-384.
- [4] Özdemir N. Türkiye'de Tarım Bölgelerine Göre Toprak Korumaya Yönelik Sorunlar Ve Öneriler. Atatürk Üniv Ziraat Fak Derg 2011; vol. 26, no 3.
- [5] Bockheim JG. Preparation Of Action Plan For Protection Of Land In Albania. Working Papers 1997; Art no. 12793.
- [6] Çolak HE, Memişoğlu T. Trabzon İlinde Tarımsal Arazi Kullanımındaki Zamansal Değişimin CBS ile Belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniv Fen Ve Müh Bil Derg 2018; vol. 18, no 3.
- [7] Brabec E, Smith C. Agricultural land fragmentation: the spatial effects of three land protection strategies in the eastern United States. Landscape and Urban Planning 2002; vol. 58, no 2, pp. 255-268.
- [8] 'Sınır ötesi tarım'. <https://www.trthaber.com/haber/dunya/sinir-otesi-tarim-140-ulke-farkli-ulkelerden-toprak-kiraladi-645357.html> (Erişim Tarihi: 20.04.2024)
- [9] Pezikoğlu F. Sürdürülebilir Tarım ve Kırsal Kalkınma Kavramı İçinde Tarım-Turizm-Kırsal Alan İlişkisi ve Sonuçları. Karamanoğlu Mehmetbey Üniv Sos Ve Eko Araş Derg 2012; vol. 2012, no 1.
- [10] Huang B, Zhang L, Wu B. Spatiotemporal analysis of rural-urban land conversion. Int J of Geogr Inf Sci 2009; vol. 23, no 3, pp. 379-398.
- [11] Yiğitbaşıoğlu H. Türkiye'de Tarım Topraklarının Kullanımında Yapılan Başlıca Yanlışlıklar ve Bunlara Bir Örnek: Eskişehir. DTCF Derg 2000; vol. 40, no 3-4.
- [12] Oztas T, Özbek AK. Tarım arazilerinin amaç dışı kullanımı; Erzurum örneği. Ekoloji 2004; vol. 13, no 52.
- [13] Li E, Endter-Wada J, Li S. Dynamics of Utah's agricultural landscapes in response to urbanization: A comparison between irrigated and non-irrigated agricultural lands. App Geogr 2019; vol. 105, pp. 58-72.
- [14] Wang L, Lyons J, Kanehi P, Bannerman R, Emmons E. Watershed Urbanization and Changes in Fish Communities in Southeastern Wisconsin Streams. JAWRA J Am Water Resour Assoc 2000; vol. 36, no 5, pp. 1173-1189.
- [15] Özelkan E, Sağlık A, Sümer SK, Bedir M, Kelkit A. Kentleşmenin Tarım Alanları Üzerine Etkisinin Uzaktan Algılama ile İncelenmesi: Çanakkale Örneği. ÇOMÜ Ziraat Fak Derg 2018; vol. 6, no 1.
- [16] Erdoğan BU. İçme Suyu Havzalarında Kentleşme Baskısı: Büyükçekmece Gölü Havzası'nda Arazi Kullanım Değişiminin Zamansal Analizi. Bartın Üniv Orman Fak Derg 2022; vol. 24, no 2.
- [17] Tunçer M. Ankara'nın Kaybolan Doğal ve Kültürel Değerleri. PEYAD 2019; vol. 2, no 2.
- [18] Pham Thi N, Kappas M, Faust H. Impacts of Agricultural Land Acquisition for Urbanization on Agricultural Activities of Affected Households: "A Case Study in Huong Thuy Town, Thua Thien Hue Province, Vietnam. Sustainability 2021; vol. 13, no 15.
- [19] Uzun B, Yomralioğlu T. Doğu Karadeniz Bölgesinde Dağınık Yerleşim Sorunlarının Mülkiyet Açısından İrdelenmesi ve Kırsal Arazi Düzenleme Modeli. Doğu Karadeniz Bölgesi Kalkınma Sempozyumu 2005; pp. 13-14.
- [20] Geray C. Türkiye'de Kırsal Yerleşme Düzeni ve Köy Kent Yaklaşımı. Ankara Üniv Sos Bil Fak Derg 1974; vol.30, no 1.
- [21] Aydoğdu M, Tarini M, Akçar HT, Aydemir A. Harran Ovasında Coğrafi Bilgi Sistemleri Ve Uzaktan Algılama İle Tarım Arazilerinde Amaç Dışı Kullanımın Tespiti. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2009.

- [22] Tolunay A, Akyol A. Kalkınma Ve Kırsal Kalkınma: Temel Kavramlar Ve Tanımlar. Turkish J of Forestry 2009; vol. 7, no 2.
- [23] Yenigül SB. New Approaches in Rural Development Policies and the Effects of These Approaches on Turkey's Rural Development Policies. Planning, 2016.
- [24] 'Tarım Reformu Genel Müdürlüğü'. <https://www.tarimorman.gov.tr/TRGM> (Erişim Tarihi: 21.04.2024)
- [25] 'Sulama Alanlarında Arazi Düzenlenmesine Dair Tarım Reformu Kanunu Uygulama Yönetmeliği'. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/3.5.859588.pdf> (Erişim Tarihi: 22.04.2024)
- [26] Gün S. Kırsal Alanın Planlanması ve Toprak Toplulaştırması. TEAD 2015; vol. 1, no 2.



## PV Panel ve PEM Yakıt Pilinden Oluşan Küçük Ölçekli Hibrid Sistemin Matematiksel Modeli

Buğra YILMAZ<sup>1\*</sup>, Muhsin Tunay GENÇOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> b.yilmaz@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 09/01/2024;

Kabul/Accepted: 04/07/2024)

**Öz:** Günümüzde, giderek artan enerji talebinin fosil yakıtlarla karşılanması sera gaz emisyonlarını yükseltmektedir. Bu yükseliş dünyamızı küresel iklim krizine doğru sürüklemektedir. Bundan dolayı, küresel ısınma geri dönüşü olmayan noktaya ulaşmadan önce ülkelerin yenilenebilir ve yeşil enerjiye geçiş yapması zorunluluk halini almaktadır. Yenilenebilir kaynaklar arasında önde gelen güneş ve hidrojen enerjisi son yıllarda yapılan çalışmalar ve yatırımlarla giderek popülerliğini artırmaktadır. Bu çalışmada, 200 W fotovoltaik (PV) panel ve 100 W Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pilinin MATLAB/Simulink'te matematiksel modellerinin oluşturulmasıyla güneş ve hidrojen enerjisini birleştiren hibrid sistem incelenmiştir. PV panelin ve PEM yakıt pilinin tanım denklemlerini kullanarak adım adım elde edilen alt modeller birleştirilerek yakıt pilinin polarizasyon ve güç grafiği elde edilmiştir. Modeller detaylı ve tekrarlanabilir bir şekilde anlatılmış ve tüm model parametreleri paylaşılmıştır. Her iki kaynak için DC-DC yükseltici dönüştürücü modelleri oluşturulup panel ve yakıt pili paralel bağlanarak tipik rezistif yük beslenmiştir. 3,795 A ve 6,205 A sırasıyla yakıt pili ve PV panelden elde edilerek 300 W güç sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** PV panel, PEM yakıt pili, hibrid sistem, matematiksel model, MATLAB/Simulink.

### Mathematical Model of Small-Scale Hybrid System Consisting of PV Panel and PEM Fuel Cell

**Abstract:** Today, meeting the ever-increasing energy demand with fossil fuels increases greenhouse gas emissions. This rise is dragging our world towards a global climate crisis. Therefore, it becomes imperative for countries to switch to renewable and green energy before global warming reaches the point of no return. Solar and hydrogen energy, which are the leading renewable sources, are increasing in popularity with the studies and investments made in recent years. This study examined a hybrid system combining solar and hydrogen energy by creating mathematical models of a 200 W photovoltaic (PV) panel and a 100 W Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell in MATLAB/Simulink. Combining the submodels obtained step by step using the definition equations of the PV panel and PEM fuel cell, the polarization and power graph of the fuel cell was obtained. The models are explained in detail and reproducibly, and all model parameters are shared. DC-DC boost converter models were developed for both sources, and the panel and fuel cell were connected in parallel to feed a typical resistive load. 3.795 A and 6.205 A were obtained from the PEM fuel cell and PV panel, respectively, providing 300 W power.

**Key words:** PV panel, PEM fuel cell, hybrid system, mathematical model, MATLAB/Simulink.

### 1. Giriş

Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar enerji ihtiyacı büyük oranda fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Yaklaşık 170 yıldır insan medeniyeti için vazgeçilmez olan fosil yakıtlar, gezegenin iklimini olumsuz şekilde değiştiren görünür etkilere yol açmaktadır. Fosil yakıt kullanımına bağlı oluşan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) gibi sera gazları, yüzeyden yansıyan güneş ışınlarının atmosferden uzaya geçmesini engelleyerek kara ve okyanus sıcaklıklarında artışa neden olmaktadır. Meydana gelen bu olumsuz durumlar, yenilenebilir ve yeşil enerji kaynaklarının kullanımını seçenек değil, bir zorunluluk haline getirmektedir.

Hidrojen enerjisi, son yıllarda sera gazı emisyonlarını azaltmak için ideal bir kaynak olarak ortaya çıkmaktadır.

Temiz bir enerji kaynağı olan hidrojen, PV panel veya rüzgâr türbiniyle üretilecek elektrik enerjisi kullanılarak elde edilebilmektedir [1-9]. Tüm yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, PV paneller kullanarak güneş enerjisiyle elektrik üretimi için en umut verici seçeneklerden biridir [10, 11]. Güneş enerjisi mevsimsel olarak değişken ve öngörülemez olduğundan, başka bir yenilenebilir enerji kaynağıyla birlikte kullanmak hibrid sistemin sürekliliğini ve güvenilirliğini artıracaktır. PEM yakıt pilleri, yüksek güç yoğunlukları, düşük çalışma sıcaklıkları, düşük yerel emisyonlar, sessiz çalışma, daha az korozyon, yığın tasarımının basitleştirilmesi ve hızlı başlatma-kapanma özellikleri nedeniyle en uygun kaynaklardan biridir [12, 13]. Sağladığı avantajlar sayesinde,

\* Sorumlu yazar: [b.yilmaz@firat.edu.tr](mailto:b.yilmaz@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1910-1816, <sup>2</sup> 0000-0002-1774-1986



PEM yakıt pilleri, güç sistemi uygulamalarının yanı sıra [14-18], otomobillerde ve uçaklarda da kullanılmaktadır [19-23].

Literatürde güneş enerjisi ve hidrojen enerjisini Simulink ortamında inceleyen çalışmalarda genellikle kaynaklardan herhangi biri veya her ikisi hazır model olarak kullanılmıştır. PEM yakıt pilinin matematiksel olarak modellendiği bazı çalışmalarda ise sadece statik aktivasyon kayıpları dikkate alınırken şarj çift katman (CDL) etkisiyle meydana gelen dinamik aktivasyon kayıpları modele dâhil edilmemiştir. Ayrıca, PEM yakıt pili modellerinde genellikle anot hidrojen ve katot oksijen basınçları sabit alınmaktadır [24-36]. Bu çalışmada gerçekleştirilen modellemede ise hem dinamik aktivasyon kayıpları modele dâhil edilirken, anot hidrojen ve katot oksijen basınçları akım ve sıcaklığa bağlı şekilde anlık olarak hesaplanmıştır.

PEM yakıt pilinin yakıt pilleri arasında ve güneş enerjisinin ise yenilenebilir enerji kaynakları arasında popüler olması nedeniyle, bu çalışmada laboratuvarında bulunan 100 W PEM yakıt pili ile 200 W PV panelin matematiksel modelleri, her iki kaynağın tanım denklemleri kullanılarak MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Güneş ışınımı ve hidrojen miktarına bağlı değişken çıkış gerilimleri DC-DC yükseltici dönüştürücü konverterler vasıtasıyla sabit 30 V DC'ye dönüştürülmüştür. PEM yakıt pilindeki kayıplar ayrı ayrı hesaplanmış, güç ve polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Polarizasyon eğrisi, 20 hücreli PEM yakıt pilinin çıkış gerilimini elde etmek için 20 ile çarpılarak yükseltici dönüştürücü girişine bağlanmıştır. PV panel ve PEM yakıt pili için yükseltici dönüştürücü ayrı ayrı tasarlanmış ve maksimum gücü elde etmek için gerekli parametreler belirlenmiştir.

## 2. Modelleme

Literatürde PV panellerin ve PEM yakıt pillerinin matematiksel modelini ayrı ayrı gerçekleştiren çalışmalar bulunmaktadır. Öncelikle PV panelin matematiksel modelini oluşturmak için Simulink'te bloklar kullanılarak aşağıdaki tanım denklemleri oluşturulmuştur. Foto-akım, PV panellerde güneş ışığının yüzeye çarpmasıyla oluşan akımdır. Güneş ışığı PV panelin yüzeyine düştüğünde, fotovoltaiik etki denilen bir durum gerçekleşir ve bu etki, güneş ışığının yarı iletken malzemelerde elektronların serbest bırakılmasına neden olur. Serbest bırakılan elektronlar, panelin içerisindeki elektrik devresinde bir akım oluşturmak için hareket ederler. Bu oluşan akım, foto-akım olarak adlandırılır ve elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilir. Foto-akımın büyüklüğü, güneş ışığının yoğunluğuna, panelin özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Foto-akım Denklem 1 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i * (T - 298)] * (G/1000) \quad (1)$$

Saturasyon akımı, panel üzerindeki gerilimin belirli bir düzeye yükseldiği ve akımın artık daha fazla artmadığı akımı ifade etmektedir. Bu durum diyot benzeri bir davranıştan kaynaklanır, çünkü artık taşıyıcıların çekilebileceği boşluklar kalmamıştır. Saturasyon akımı Denklem 2 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_0 = I_{rs} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * \exp\left[\frac{q.E_{g0} * (1/T_n - 1/T)}{n.K}\right] \quad (2)$$

Ters saturasyon akımı ise, diyotun ters polarize edildiği durumda akışkanın geçiş akımıdır. Diyotun tersine doğru akı yönündeki akımdır ve diyotun tersine gerilim altında çalışırken akan minimum akımdır. Bu akım, diyodun gerilim akım karakteristiğinin negatif yönde eğimli kısmına karşılık gelmektedir. Ters saturasyon akımı Denklem 3 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q.V_{oc}}{n.N_s.K.T}\right)} - 1} \quad (3)$$

PV panellerde şönt akımı, panellerin bir kısmının geçici olarak veya kalıcı olarak kapatılması veya etkisiz hale getirilmesi durumunda ortaya çıkan bir akımdır. Bu, bir hücre veya bir dizi hücredeki bir kısmın kısa devre olması veya etkin olmayan bir şekilde çalışması sonucunda gerçekleşebilir. Şönt akımı, panelin toplam verimliliğini azaltır çünkü panel nominal gücünden daha az bir güç sağlamaktadır. Bu durum, panelin üzerindeki bir leke, kırık veya başka bir hasar nedeniyle de oluşabilmektedir. Şönt akımı Denklem 4 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \quad (4)$$

Fotovoltaik akım, fotovoltaik etkiyi kullanarak güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik PV panellerden üretilen akımdır. Bu akım, PV panelin çıkış terminallerinden dış devreye iletilir ve elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Fotovoltaik akım Denklem 5 ile ifade edilmektedir [37-40].

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (5)$$

Burada,  $I_{ph}$  foto-akım (A);  $I_0$  doyma akımı (A);  $I_{rs}$  ters doyma akımı (A);  $I_{sh}$  şönt akımı (A);  $I$  fotovoltaik akım (A);  $I_{sc}$ , kısa devre akımı (A);  $T$ , çalışma sıcaklığı (K);  $T_n$ , nominal sıcaklık (K);  $G$ , güneş ışınımı (W/m<sup>2</sup>);  $V_{oc}$ , açık devre gerilimi (V);  $N_s$ , seri bağlı hücre sayısı;  $N_p$ , paralel bağlanan hücre sayısı;  $k_i$ , 25 °C ve 1000 W/m<sup>2</sup>'de hücrelerin kısa devre akımı (A);  $q$ , elektron yükü (C);  $n$ , ideallik faktörü;  $K$ , Boltzmann sabiti (J/K);  $E_{go}$ , yarı iletkenin bant aralığı enerjisi (eV);  $R_s$ , seri direnç (Ω);  $R_{sh}$ , şönt direnci (Ω);  $P_r$ , nominal gücü (W) tanımlar;  $V_{mp}$ , maksimum güçteki gerilim (V);  $I_{mp}$ , maksimum güçte akım (A).

İkinci olarak PEM yakıt pilinin tanım denklemleri ile Simulink modeli oluşturulmuştur. PEM yakıt pili çıkış gerilimi, konsantrasyon kaybı, ohmik kayıp, statik ve dinamik aktivasyon kayıpları gibi bazı kayıplardan etkilenmektedir. Tek PEM yakıt pili hücresinin gerilimi Denklem 6 ile tanımlanmaktadır [41-53].

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (6)$$

Yakıt pilinin açık devre gerilimi, yük olmadığı durumu temsil etmektedir. Bu gerilim, teorik olarak hücrenin termodinamik potansiyeli olarak tanımlanan Nernst gerilimi olarak ifade edilir ve değeri yaklaşık 1.2 V'dir. Ancak, uygulamalarda bu değerden daha düşüktür. Nernst gerilimi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [41-53].

$$E_{Nernst} = 1,229 - \left( 8,5 * 10^{-4} * (T - 298) + 4,308 * 10^{-5} * T * \ln(P_{H_2} * (P_{O_2})^{1/2}) \right) \quad (7)$$

CO<sub>2</sub>, oksijen konsantrasyonunu temsil etmekte ve Denklem 8 ile hesaplanırken statik aktivasyon gerilimi düşümü matematiksel olarak Denklem 9 ile ifade edilmektedir [41-53].

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 * 10^6 * \exp(-498/T)} \quad (8)$$

$$V_{st\_act} = \beta_1 + \beta_2 * T + \beta_3 * T * \ln(C_{O_2}) * \beta_4 * T * \ln(I) \quad (9)$$

Ohmik gerilim düşüşü, grafit toplayıcı plakalarda ve grafit elektrotlarda elektron transferine ve katı polimer membranda proton transferine karşı oluşan direnç sebebiyle meydana gelmektedir. Bu kayıp Denklem 10 ile hesaplanmaktadır [41-53].

$$V_{ohmic} = I * (R_m + R_c) \quad (10)$$

$$R_m = \frac{\rho_m * l}{A} \quad (11)$$

$$\rho_m = \frac{181,6 * [1 + 0,039 * (I/A) + 0,062 * (T/303)^2 * (I/A)^{2,5}]}{[\lambda - 0,634 - 3 * (I/A)] * \exp(4,18 * \frac{T - 303}{T})} \quad (12)$$

Konsantrasyon kaybı, reaktanların tüketilmesidir ve Denklem 13 ile ifade edilmektedir [41-53].

$$V_{con} = -B * \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (13)$$

$$B = \frac{R * T}{2 * F} \quad (14)$$

$$\frac{dV_{dy\_act}}{dt} = \frac{I}{C} - \frac{V_{dy\_act}}{R_c C} \quad (15)$$

$$R_c = \frac{V_{st\_act} + V_{con}}{I} \quad (16)$$

Su buharı, doymuş buhar basıncı olarak ifade edilir ve Denklem 17'deki gibi tanımlanmaktadır [41-53].

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2,18 + 2,95e^{-2} T_c - 9,18e^{-5} T_c^2 + 1,44e^{-7} T_c^3 \quad (17)$$

$$T_c = T_{cell} - 273,15 \quad (18)$$

$P_{H_2}$  hidrojenin kısmi basıncını ifade ederken  $P_{O_2}$  oksijenin kısmi basıncını temsil eder Gazdaki farklı kısmi basınçlar, reaktanlardaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Reaktanların basınçları Denklem 19 ve 20 ile hesaplanmaktadır [41-53].

$$P_{H_2} = 0,5 P_{H_2O}^{sat} \left[ \exp \left( -\frac{1,635 J}{T_{cell}^{1,334}} \right) \left( \frac{P_a}{P_{H_2O}^{sat}} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

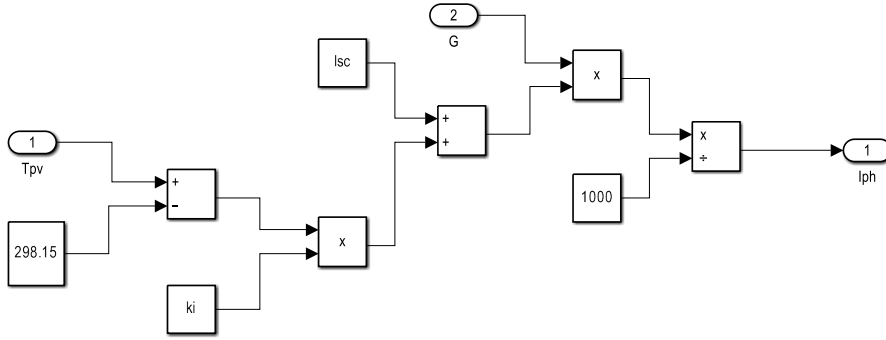
$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{sat} \left[ \exp \left( -\frac{4,192 J}{T_{cell}^{1,334}} \right) \left( \frac{P_c}{P_{H_2O}^{sat}} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Burada,  $V_{FC}$ , pil gerilimi (V);  $E_{Nernst}$ , Nernst gerilimi (V);  $V_{st\_act}$ , sabit aktivasyon kaybı gerilimi (V);  $V_{ohmik}$ , ohmik kayıp gerilimi (V);  $V_{con}$ , konsantrasyon kaybı gerilimi (V);  $T$ , sıcaklık (K);  $P_{H_2}$ , hidrojen kısmi basıncı (atm);  $P_{O_2}$ , oksijen kısmi basıncı (atm);  $\beta$ , deneyim parametreleri;  $R_m$ , proton değişim membranının empedansı ( $\Omega$ );  $R_c$ , eşdeğer kontak direnci ( $\Omega$ );  $\rho_m$ , membrana özgü direnç ( $\Omega \cdot cm$ );  $I$ , pil akımı (A);  $I_{lim}$ , pil limit akımı (A);  $l$  proton değişim membranının kalınlığıdır (cm);  $A$ , proton değişim zarının etkin alanı ( $cm^2$ );  $\lambda$ , proton değişim zarının su içeriği;  $C_{O_2}$ , oksijen konsantrasyonları ( $mol/cm^3$ );  $R$  ideal gaz sabiti (J/K.mol);  $F$ , Faraday sabiti (C);  $V_{dy\_act}$ , dinamik aktivasyon kaybı gerilimi (V);  $C$  çift katmanlı yük;  $P_{H_2}$  kısmi hidrojen basıncı (bar);  $P_{O_2}$  kısmi oksijen basıncı (bar);  $P_a$  anot kısmi basıncı (bar);  $P_c$  katot kısmi basıncı (bar);  $J$  akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ );  $P_{H_2O}^{sat}$  suyun doyma basıncı (bar);  $T$  pil sıcaklığı (K);  $T_c$  celsius cinsinden sıcaklık ( $^{\circ}C$ ). Formüllerde kullanılan tüm sabitler Tablo 1'de verilmiştir.

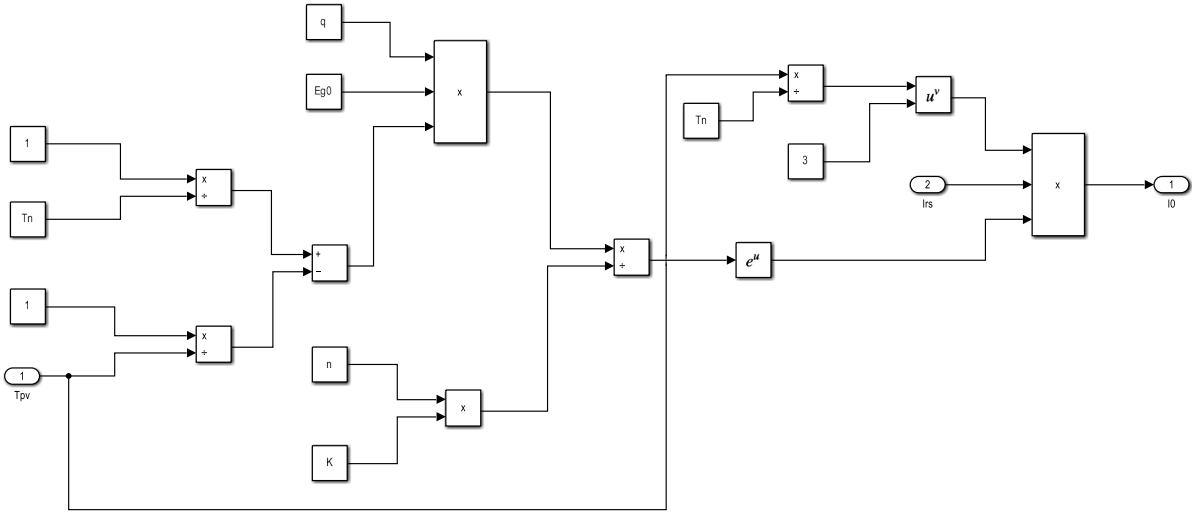
**Tablo 1.** PV panel ve PEM yakıt pili matematik modelindeki sabitler.

PV Panel Sabitleri		PEM Yakıt Pili Sabitleri	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
$k_1$	0,0032 A	R	8,314 J/K.mol
$T_n$	298 K	F	96487 C
q	1,6e-19 C	$\beta_1$	-0,9514
n	1,3	$\beta_2$	3,12e-3
K	1,38e-23 J/K	$\beta_3$	7,4e-5
$E_{g0}$	1,1 eV	$\beta_4$	-1.87e-4
$R_s$	0,221 $\Omega$	l	51 $\mu m$
$R_{sh}$	415,4 $\Omega$	A	50 $cm^2$
$P_r$	200 W	$\lambda$	14
$V_{mp}$	26,4 V	$R_c$	0,0003 $\Omega$
$I_{mp}$	7,58 A	$I_{lim}$	14 A
$V_{oc}$	32,9 V		
$I_{sc}$	8,21 A		
$N_s$	54		
$N_p$	1		

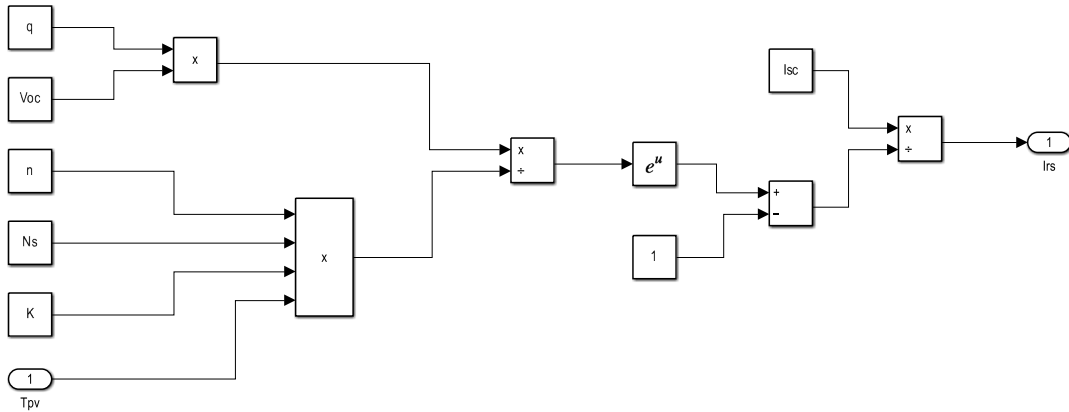
Şekil 1-5'te foto-akım, doyma akımı, ters doyma akımı, şönt akım ve fotovoltaik akım gösterilmektedir. Bu modelde güneş ışınımı (G) 1000 W/m<sup>2</sup>, ortam sıcaklığı (T) 25  $^{\circ}C$  alınmıştır. Blok diyagramlar sırasıyla Denklem 1-5'e göre oluşturulmuştur.



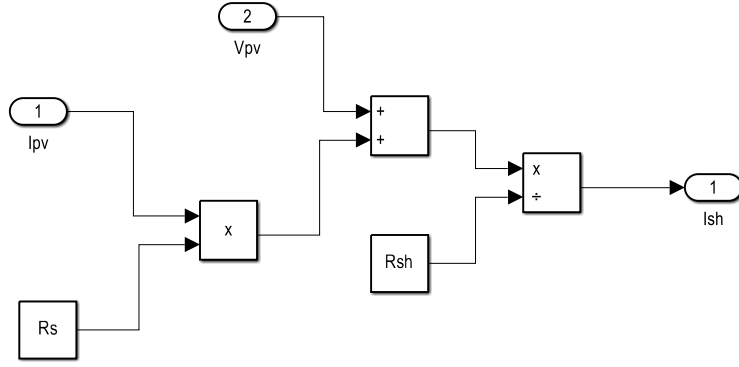
Şekil 1. Foto-akım blok diyagramı.



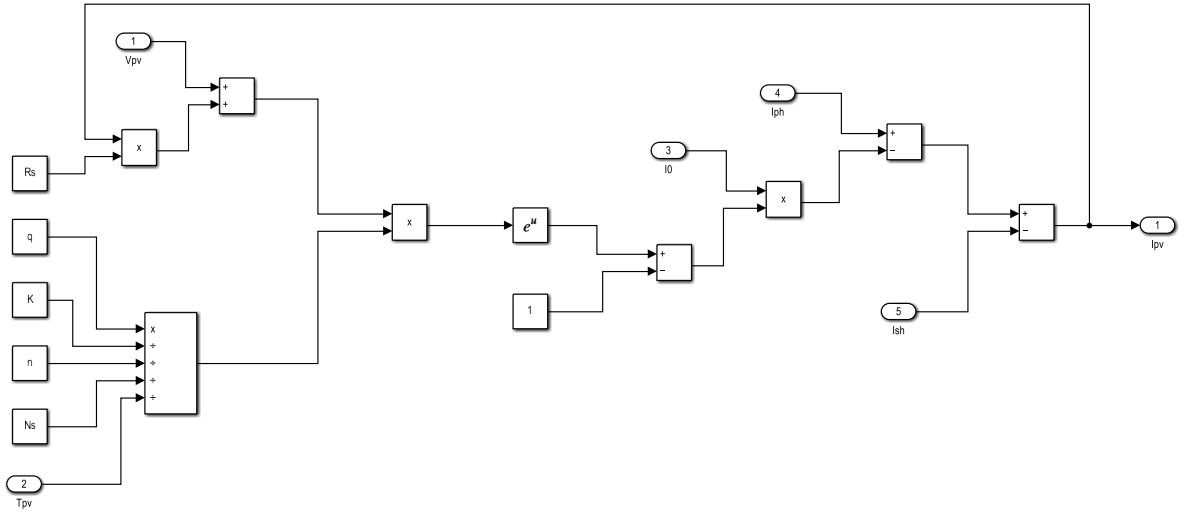
Şekil 2. Doyma akımı blok diyagramı.



Şekil 3. Ters doyma akımı blok diyagramı.

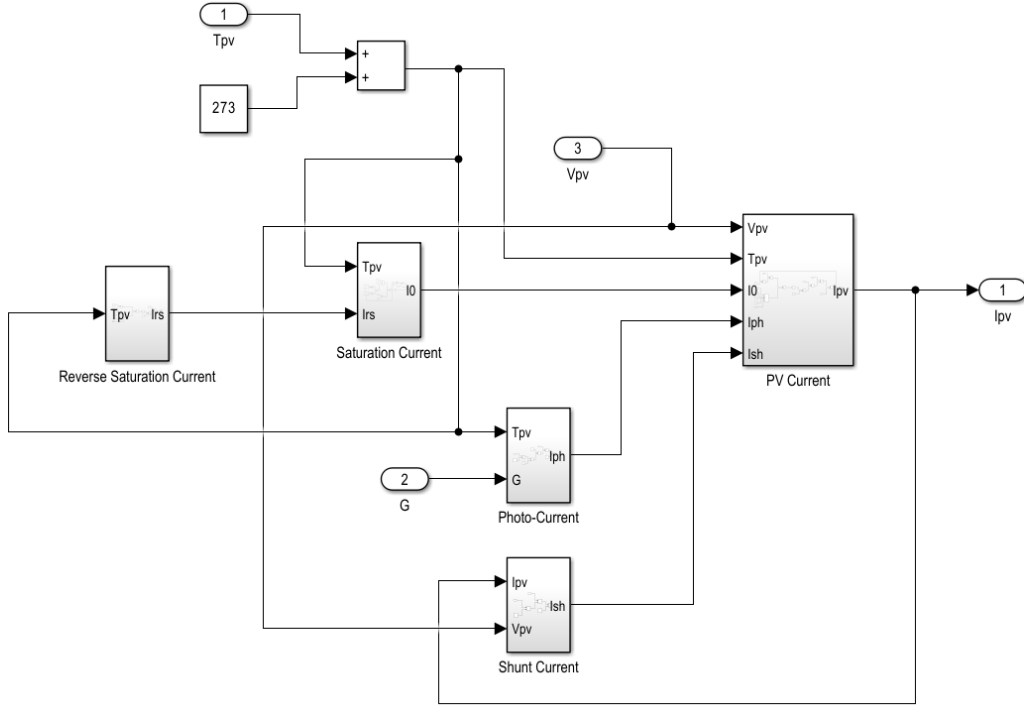


Şekil 4. Şönt akım blok diyagramı.



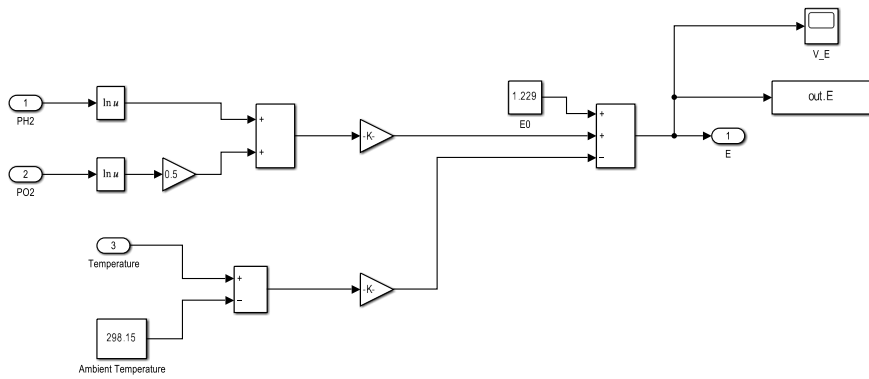
Şekil 5. Fotovoltaik akım blok diyagramı.

PV panel alt sistemi, yukarıdaki blok şemaların Şekil 6'da gösterildiği gibi bağlanmasıyla oluşturulmuştur.



Şekil 6. PV panel alt sistemi.

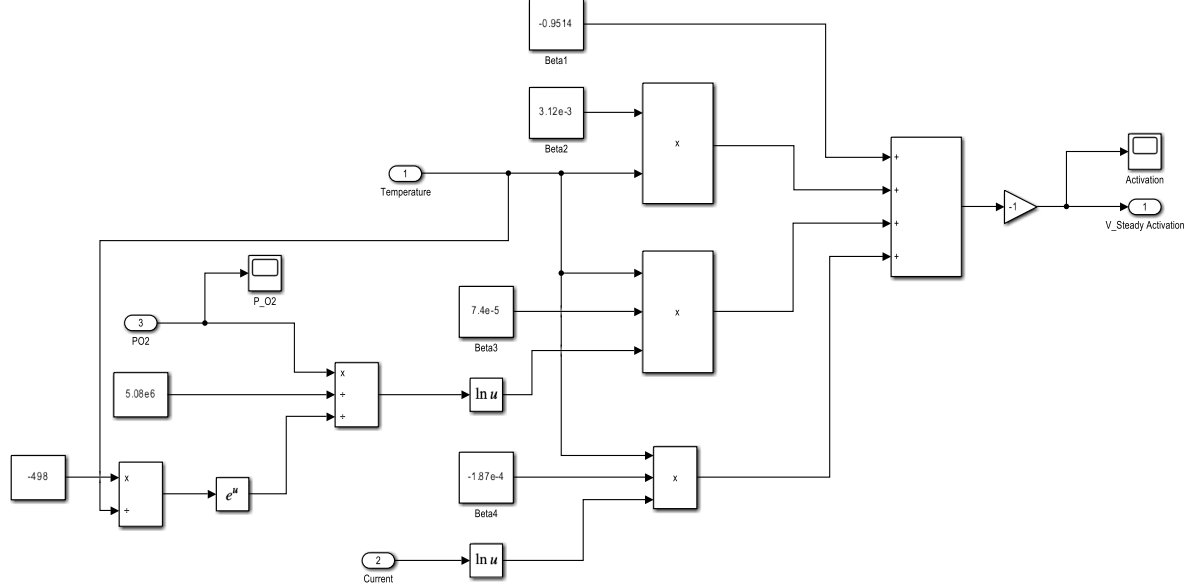
Matlab/Simulink'teki bir PEM yakıt pili modeli, belirli kararlı durum ve dinamik analiz denklemlerini gerektirmektedir. Seçilen giriş parametreleriyle bu model, PEM yakıt pilinin tepkisini göstermektedir. Bu çalışmada 20 hücreden oluşan Horizon H-100 yakıt pili parametrelerine göre modelleme yapılmıştır. İdeal gerilim açık devre durumunda yani yakıt pilinin dış devresinden akım geçmediğinde ortaya çıkar ve bu gerilime Nernst gerilimi adı verilir. Denklem 6, Nernst geriliminden tüm kayıpların çıkarılması sonucu yakıt pilinin çıkış gerilimi elde edilir. Simülasyonda bu değer tek bir pil için anlık olarak hesaplanmış ve hücre sayısı 20 ile çarpılarak yığının çıkış gerilimi elde edilmiştir. Şekil 7'de Denklem 7 ve 8'e göre oluşturulan Nernst gerilim blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 7. Nernst gerilimi blok diyagramı

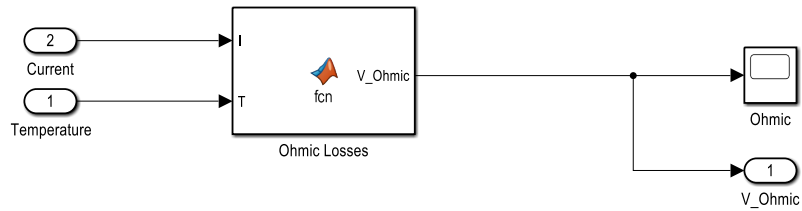
İlk aşamada yakıt pilinde oksidasyon ve redüksiyona uğrayan kimyasal reaksiyonlar sırasında aktivasyon kayıpları meydana gelir. Elektrotlardaki reaksiyon hızının yavaş olması nedeniyle kayıplar artar. Yakıt pilinin ürettiği toplam gerilimin bir kısmı kimyasal reaksiyonu güçlendirmek için kullanılır. Aktivasyon kayıpları düşük

akım yoğunluğunda meydana gelir. İhtiyaç duyulan aktivasyon enerjisinin üstesinden gelerek bir kimyasal reaksiyonu başlatmak için gereken gerilim olarak da tanımlanabilirler. Düşük sıcaklıktaki yakıt pilleri için aktivasyon kayıpları önemlidir ve genellikle katottan kaynaklanır. Sıcaklık arttıkça aktivasyon kayıpları daha az kritik hale gelir. Aktivasyon kayıpları genellikle Tafel denklemleri ve Butler-Vollmer denklemleri ile temsil edilir. Bu denklemler basitleştirilip genişletilerek Denklem 9 elde edilebilir. Sabit aktivasyon kayıpları bu denkleme göre elde edilmiştir. Şekil 8’de sabit aktivasyon kayıpları blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 8. Sabit aktivasyon kayıpları blok diyagramı.

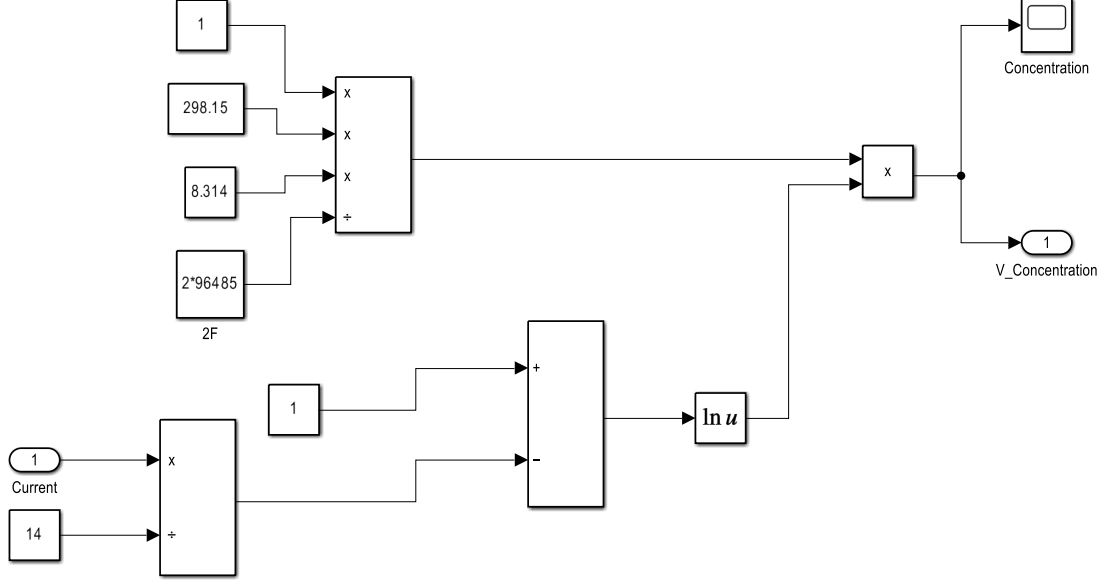
İkinci aşamada yakıt pilindeki iki dirençten dolayı ohmik kayıplar ortaya çıkar. Birincisi elektronların dış devreden geçerken gösterdiği dirençtir. İkincisi, proton değişim zarından akarken protonların direncidir. Bu dirençler yakıt pilinin potansiyelinin kaybolmasına neden olmaktadır. Bu nedenle toplam ohmik direnç, elektron ohmik kayıplarının ve proton ohmik kayıplarının toplamı olarak modellenilebilir. Ohmik kayıplar blok diyagramı Denklem 10-12’ye göre oluşturulmuştur. Şekil 9 ohmik kayıplar blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 9. Ohmik kayıplar blok diyagramı.

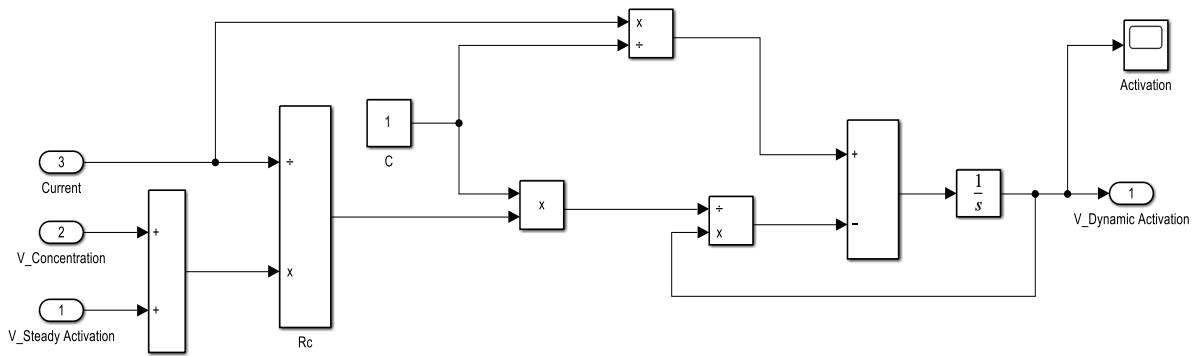
Üçüncü ve son aşamada ise konsantrasyon kayıpları meydana gelir. Kütle taşıma kayıpları olarak da bilinirler. Bu kayıplar sırasıyla anot ve katottaki hidrojen ve oksijen konsantrasyonuyla ilgilidir. Daha yüksek akım yoğunluklarında bu kayıplar önemlidir. Akım yoğunluğu arttıkça yani PEM yakıt pilinden daha fazla akım çekildikçe yakıt ve oksijen tüketimi artar. Elektrot yüzeyindeki reaktanların beslenme hızı ve tüketim hızı eşitlendiğinde reaktanların konsantrasyonu sıfıra eşit olur. Bu durum, reaktanlar beslendiğinde tükendiğinde ve elektrot üzerinde kalmadığında meydana gelir. Bu olgunun meydana geldiği akım yoğunluğu, sınırlayıcı akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu bu sınırın üzerine çıkarsa, tüketim oranı besleme oranından daha büyük

olacağından, daha az reaktan olacağından yakıt pili çalışmaz hale gelecektir. Konsantrasyon kayıpları Denklem 13 ve 14'e göre elde edilmiştir. Şekil 10 konsantrasyon kayıpları blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 10. Konsantrasyon kayıpları blok diyagramı.

PEM yakıt pillerinin modellenmesinde dinamik ve kararlı durum modelleri arasında bir ayrım bulunmaktadır. Özellikle dinamik model, aktivasyon kayıplarındaki değişiklikleri içermekte ve karmaşık termodinamik ilkeleri kullanmaktadır. Yakıt pilinin dinamik davranışı ağırlıklı olarak şarj çift katmanı (CDL) olgusundan kaynaklanmaktadır. Bu, iki farklı malzeme ara yüzey oluşturduğunda gözlenir ve ilgili yüzeylerde yükün oluşmasına ve birikmesine yol açar. Daha sonra malzemeler arasında bu yükün aktarımı meydana gelir ve yakıt pilindeki hem aktivasyon hem de konsantrasyon kayıplarını etkiler. Bu dinamik davranışı kapsamlı bir şekilde anlamak ve tahmin etmek için 15 ve 16 numaralı denklemler gereklidir. Şekil 11 dinamik aktivasyon kayıplarını göstermektedir.

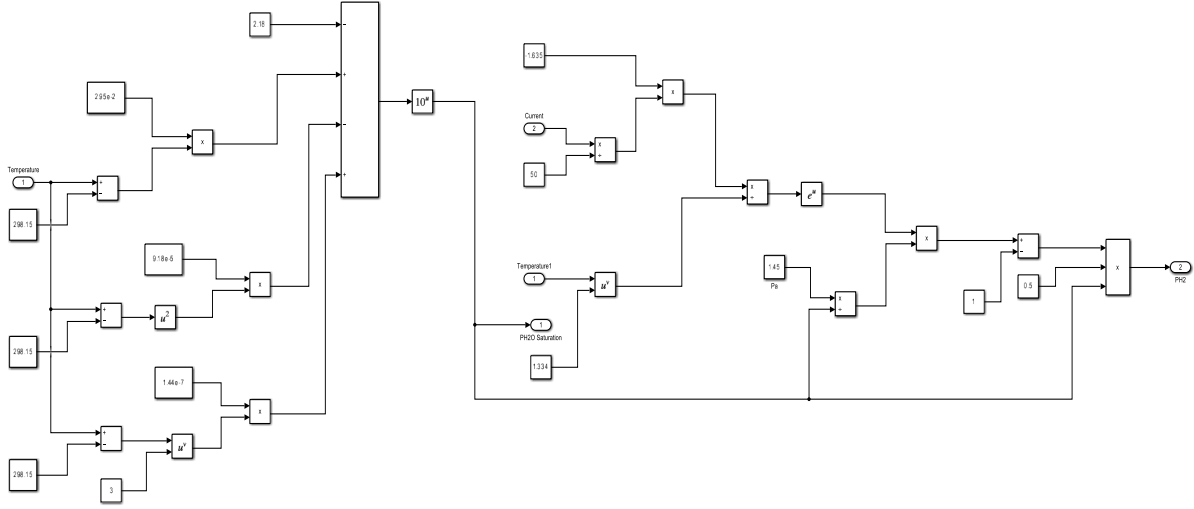


Şekil 11. Dinamik aktivasyon kayıpları blok diyagramı.

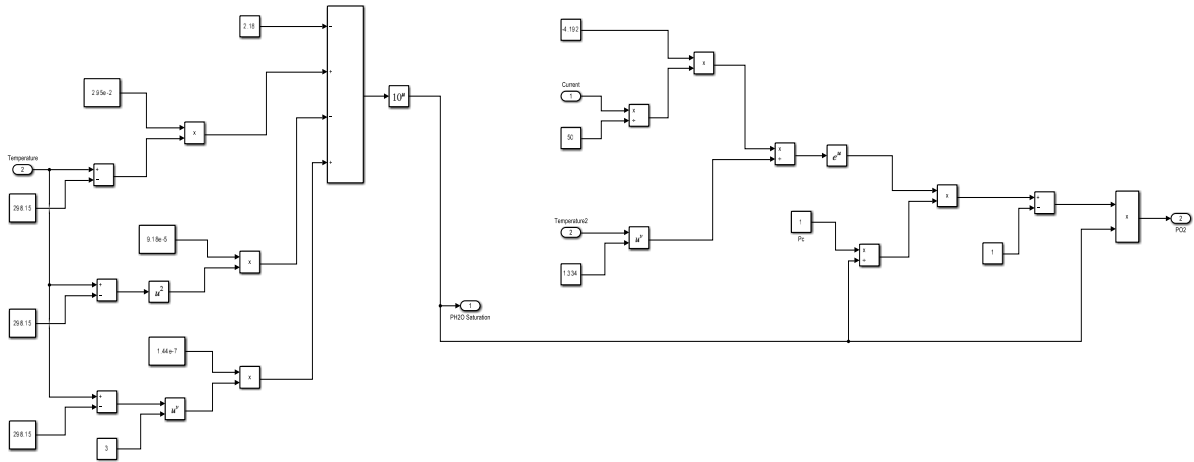
PEM yakıt pili modelinde, hidrojen ve oksijenin anot ve katottaki kısmi basınçları girdi verisi olarak kabul edilmiştir. Hidrojen ve oksijenin kısmi basınçları Denklem 17-20'ye göre oluşturulmuştur. Basınçları hesaplamak



için  $H_2O$ 'nun doyma basıncı denklemi kullanılmalıdır. Denklem 17, her iki kısmı basınç blok diyagramının içinde ve solunda oluşturulmuştur. Şekil 12 ve 13 sırasıyla anot hidrojen ve katot oksijen basıncını göstermektedir.

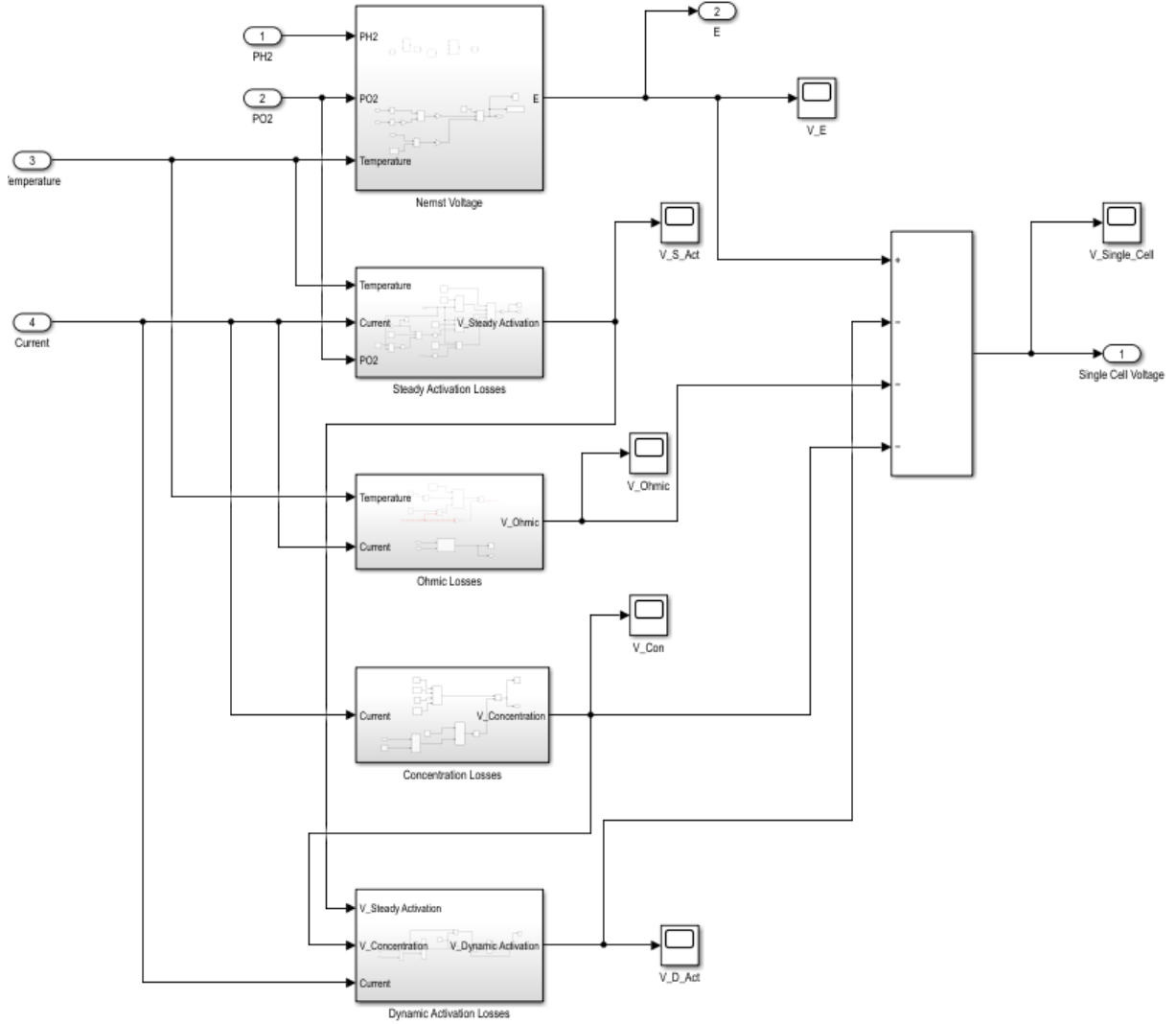


Şekil 12. Anot hidrojen basıncı blok diyagramı.



Şekil 13. Katot oksijen basıncı blok diyagramı.

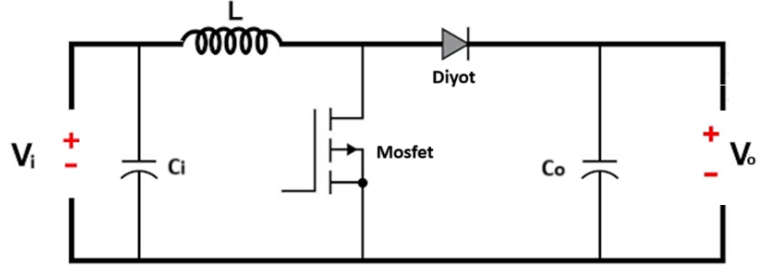
PEM yakıt pili alt sistemi, Şekil 14'te gösterildiği gibi yukarıdaki blok diyagramların bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Çıkış gerilimleri matematiksel PV paneller ve PEM yakıt pili modellerinde farklılık göstermektedir. Bu nedenle yükseltici dönüştürücü tasarımında kullanılan indüktör ve kondansatör değerleri maksimum güç elde edecek şekilde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu değerler çıkış gerilimleri yaklaşık 30 V olacak şekilde belirlenmiştir. 30 V DC bara üzerinden paralel bağlanan iki kaynak  $3 \Omega$  değerindeki bir yük beslemiştir. L, C, görev periyotları (D) ve anahtarlama frekansı ( $f_s$ ) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 15'te her iki kaynak için yükseltici dönüştürücü devre şeması gösterilirken Şekil 16'da ise hibrid sistemin simülasyon modeli gösterilmiştir.



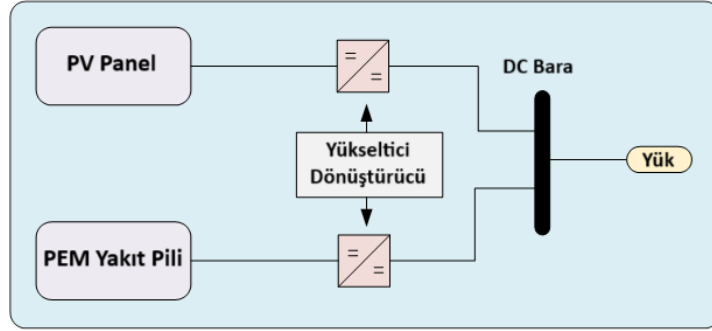
Şekil 14. PEM yakıt pili alt sistemi.

Tablo 2. L, C, D, ve f değerleri.

PV Panel Yükseltici Dönüştürücüsü		PEM YP Yükseltici Dönüştürücüsü	
L <sub>1</sub>	0,0016 H	L <sub>2</sub>	0,0047 H
C <sub>1</sub>	0,0040 F	C <sub>2</sub>	0,0068 F
D <sub>1</sub>	%11,77	D <sub>2</sub>	%47,83
f <sub>s1</sub>	25 kHz	f <sub>s2</sub>	25 kHz



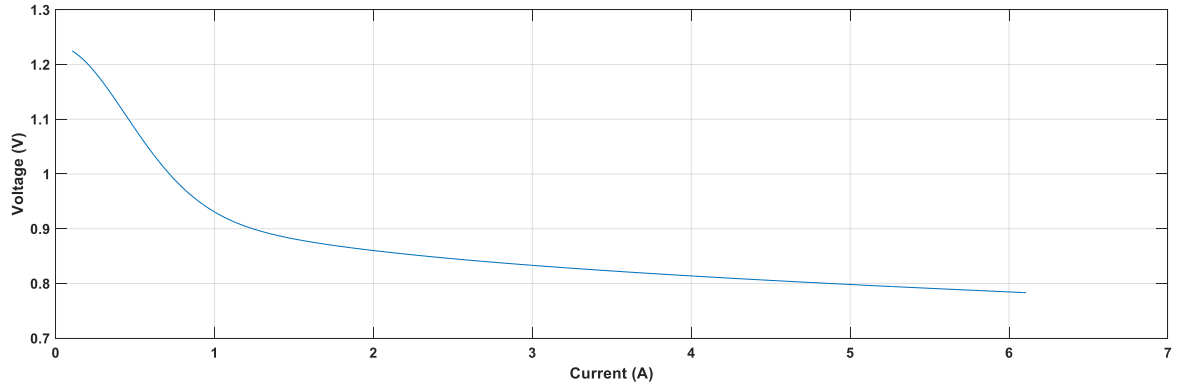
Şekil 15. Yükseltici dönüştürücü devre şeması.



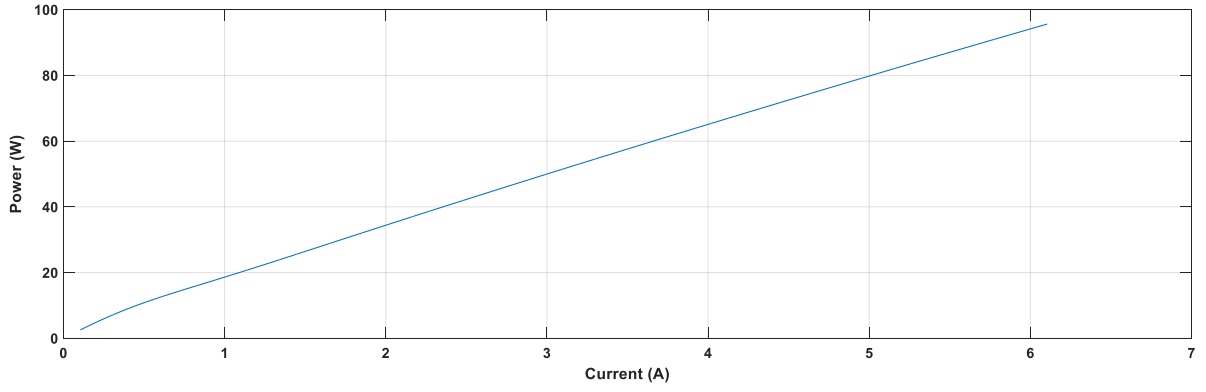
Şekil 16. Hibrid sistem simülasyon modeli.

### 3. Simülasyon Sonuçları

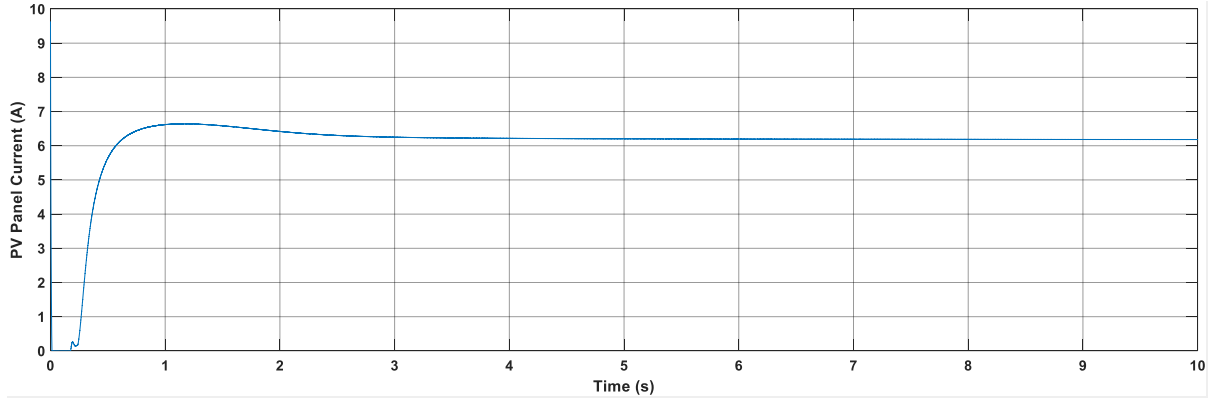
Aşağıdaki grafikler Matlab/Simulink R2021b verisi kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon süresi 10 saniye ve simülasyon türü Discrete olarak seçilmiştir. Örnekleme zamanı  $5e-6$ 'dır. Polarizasyon eğrisi Şekil 17'de, güç eğrisi ise Şekil 18'de verilirken, simülasyon sonucunda PV panel akımı ve PEM yakıt pili akımı Şekil 19 ve 20'de verilmiştir.



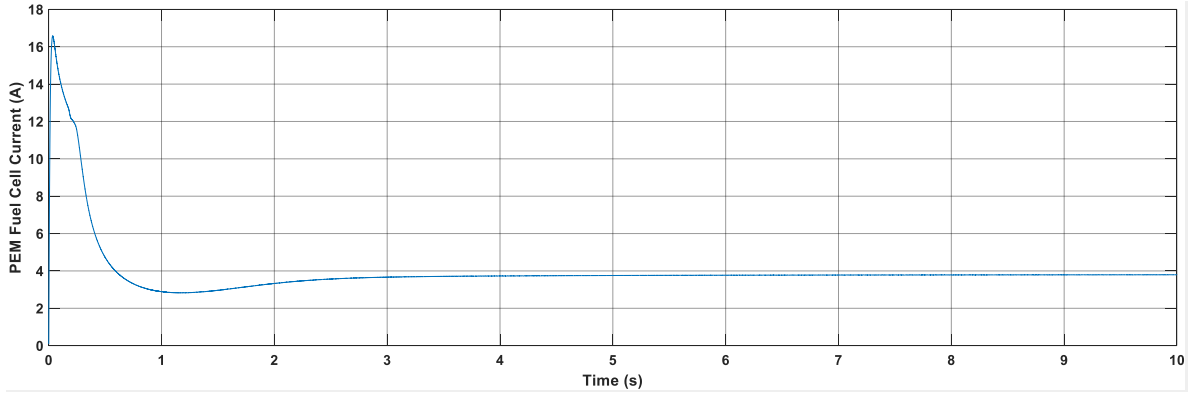
Şekil 17. Polarizasyon eğrisi.



Şekil 18. Güç eğrisi.



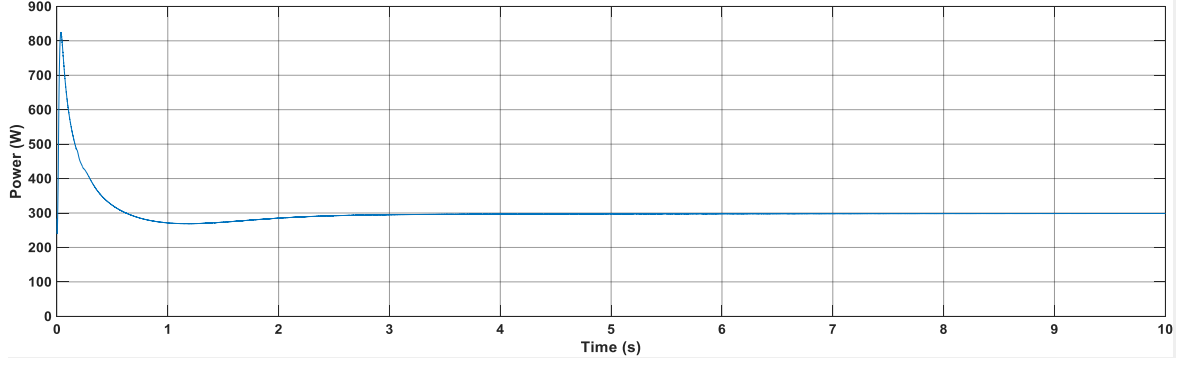
Şekil 19. PV panel akımı.



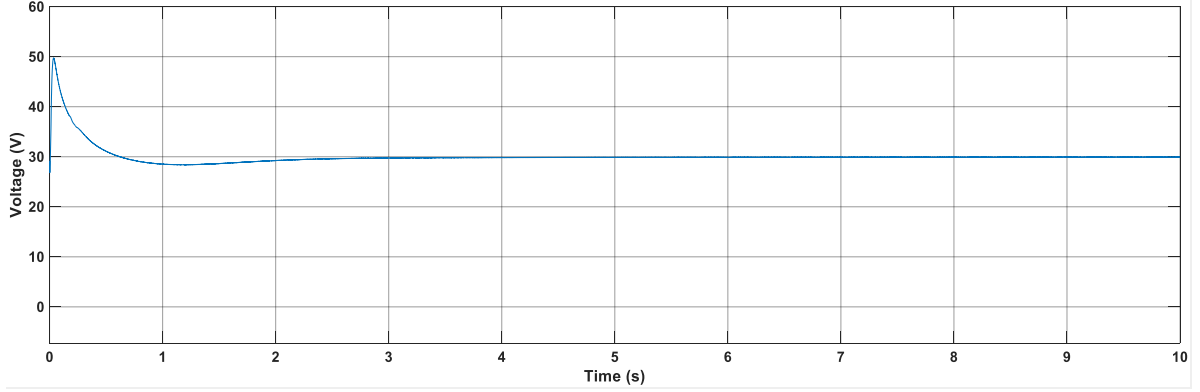
Şekil 20. PEM yakıt pili akımı.

Şekil 19 ve 20’de görüldüğü gibi her iki kaynak için yaklaşık 2 saniyelik bir geçici durum söz konusudur. Bu sürenin sonunda akımlar kararlı duruma ulaşmıştır. Güç değerlerine göre normalde 6,67 A PV panel ve 3,33 A PEM yakıt pili akımı beklenirken kaynakların ve konverterlerin modellenmesi sırasında bazı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle iki kaynak için beklenen akım değerleri ile simülasyon arasında yaklaşık 0,46 A fark

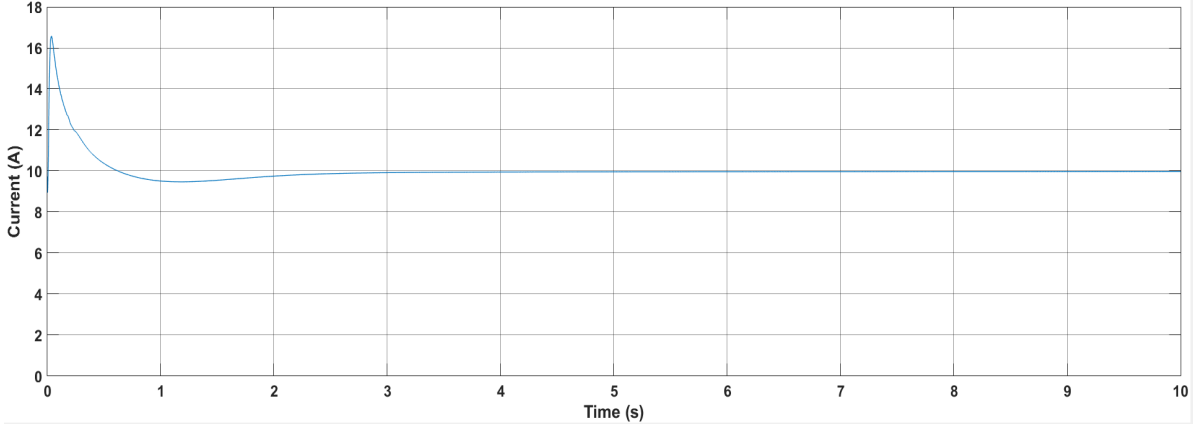
oluşturmuştur. Şekil 21-23'te sırasıyla yük üzerindeki güç, gerilim ve akım grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 21. Yük gücü.



Şekil 22. Yük gerilimi.



Şekil 23. Yük akımı.

Yük grafikleri, yaklaşık 2 saniyelik geçici bir sürenin ardından yük geriliminin 30 V ve yük akımının 10 A olduğunu göstermektedir. Kararlı durumda, PV panel tarafından yaklaşık 6,205 A, PEM yakıt pili tarafından ise 3,795 A sağlanmaktadır. İki kaynağın paralel bağlanması sonucunda 3  $\Omega$  yük üzerinden 10 A akım akmış olup 300 W güç sağlanmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Sera gazı emisyonlarının azaltılması için yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanılması her geçen zaman daha büyük önem kazanmaktadır. Bu sebeple güneş ve hidrojen enerjisinin önemi bugüne kadar olduğu gibi gelecekte de giderek artacaktır. Bu çalışma ile güneş enerjisini ve hidrojen enerjisini elektriğe dönüştüren PV paneller ve PEM yakıt pilleri için referans alınabilecek detaylı matematiksel modeller elde edilmiştir. Her iki kaynağa ait tanım denklemleri ve sabitler Matlab/Simulink'te blok diyagramlar kullanılarak açık bir şekilde adım adım oluşturulmuştur. PEM yakıt pili için Nernst gerilimi, sabit aktivasyon kayıpları, omik kayıplar, konsantrasyon kayıpları ve dinamik aktivasyon kayıpları hesaplanarak tek bir hücre gerilimi elde edilmiştir. Bu gerilim toplam hücre sayısı ile çarpılarak yakıt pilinin çıkış gerilimine dönüştürülmüştür. Elde edilen polarizasyon eğrisi Horizon Educational üreticisinin H-100 yakıt pili için paylaştığı eğri ile benzerlik göstermekle beraber oluşan farklılıklar simülasyon parametreleri ile gerçek parametreler arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. PEM yakıt pili modellenirken sabit aktivasyon kayıplarının yanı sıra dinamik aktivasyon kayıpları da oluşturulmuştur. Aynı zamanda anot ve katottaki gaz basınçlarını sabit kabul etmek yerine akım ve sıcaklığa bağlı şekilde değişken modellenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyon, 200 W PV panel ve 100 W PEM yakıt pilinin paralel olarak rezistif bir yük beslediği sistemin tepkilerini göstermiş olup güneş ve hidrojen enerjisiyle beklenen şekilde 300 W güç elde edilmiştir. Her iki kaynaktan yüke akan akımların beklenen değerlere oldukça yakın olması modellemenin doğruluğunu göstermektedir. Kaynakların ve dönüştürücülerin modellenmesinin iyileştirilmesi ve gerçeğe yakın parametre değerlerinin tespit edilmesiyle 0,46 A'lık fark ortadan kaldırılabilir ancak sonuçlar tatmin edicidir. Grafiklerde görülen anlık pik değerler 0,25 saniyeden daha kısa sürmüş olup konverter, PV panel ve PEM yakıt pilindeki geçici durumlar sebebiyle oluşmuştur. Bu analizde PEM yakıt pilinin hidrojen ihtiyacının depolama tanklarıyla sağlandığı kabul edilmiştir. Ek olarak PV panelin ürettiği enerji ile elektrolizör modeli beslenerek yakıt pili için hidrojen üretilmesi ve üretilen DC'nin inverter vasıtasıyla AC'ye dönüştürülerek AC yüklerin beslemesi gelecek çalışmalarda yapılacak hedeflerdir.

#### Kaynaklar

- [1] Özgirgin E, Devrim Y. And Albostan A. Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer PEM fuel cell system for micro-cogeneration applications. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40(44):15336–15342.
- [2] Achour Y, Berrada A. Arechkik A. And El Mrabet R. Techno-Economic Assessment of hydrogen production from three different solar photovoltaic technologies. *Int J Hydrogen Energy* 2023; 48(83):32261–32276.
- [3] Ghenai C, Bettayeb M. Grid-Tied Solar PV/Fuel Cell Hybrid Power System for University Building. *Energy Procedia* 2019; 159: 96–103.
- [4] Rezk H, Alghassab M, and Ziedan HA. An optimal sizing of stand-alone hybrid PV-fuel cell-battery to desalinate seawater at Saudi NEOM city. *Processes* 2020;8(4).
- [5] Rezk H, et al., Fuel cell as an effective energy storage in reverse osmosis desalination plant powered by photovoltaic system. *Energy* 2019;175: 423–433.
- [6] Maleki A, Pourfayaz F, and Ahmadi MH, Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach. *Sol, Energy* 2016;139:666–675.
- [7] Wang Y, Su B, Yang X, Chen Z, Wang S. A green hydrogen production system based on solar-assisted biogas steam reforming. *Appl. Therm. Eng* 2024.
- [8] Baral S, and Šebo J, Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems. *Heliyon* 2024; 10(4) 1–14.
- [9] Karayel GK, and Dincer I. A study on green hydrogen production potential of Canada with onshore and offshore wind power, *Clean J. Prod* 2023.
- [10] Yilanci A, Dincer I, and Ozturka HK. Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(24): 7538–7552.
- [11] Ramakrishnan S, Delpisheh M, Convery C, Niblett D, Vinothkannan M, and Mamlouk M, Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective, *Renew. Sustain. Energy Rev* 2024.
- [12] Mehta V, and Cooper JS. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *J. Power Sources* 2003;114(1) 32–53.
- [13] Calasan M, Micev M, Hasanien HM, and Abdel Aleem SHE. PEM fuel cells: Two novel approaches for mathematical modeling and parameter estimation. *Energy* 2023, 2024.
- [14] Eroglu M, Dursun E, Sevencan S, Song J, Yazici S, and Kilic O. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36(13):7985–7992.
- [15] Duman AC, and Güler Ö. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustain Cities Soc* 2018;42(6):107–126.

- [16] Benlahbib B. et al., Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(53):29110–29122.
- [17] Bendary AF, and Ismail MM. Battery charge management for hybrid PV/wind/fuel cell with storage battery. *Energy Procedia* 2019; 162: 107–116.
- [18] Soyuturk G, Kizilkan O, Ezan MA, and Colpan CO. Design, modeling, and analysis of a PV/T and PEM fuel cell based hybrid energy system for an off-grid house. *Int J Hydrogen Energy* 2024.
- [19] Suha Yazici M, Yavasoglu HA and Eroglu M. A mobile off-grid platform powered with photovoltaic/wind/battery/fuel cell hybrid power systems. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38(26): 11639–11645.
- [20] Taç B, Arat HT, Baltacıoğlu E, and Aydın K. Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44(20): 10120–10128.
- [21] Arat HT, and Sürer MG. Experimental investigation of fuel cell usage on an air Vehicle's hybrid propulsion system. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(49): 26370–26378.
- [22] Ozbek E, Yalin G, Karaoglan MU, Ekici S, Colpan CO, and Karakoc TH. Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(30): 16453–16464.
- [23] Arat HT, Sürer MG, Gökpınar S, and Aydın K. Conceptual design analysis for a lightweight aircraft with a fuel cell hybrid propulsion system. *Energy Sources Part A Recover. Util Environ. Eff* 2020;45(1)46–60.
- [24] Natarajan SK, Kamran F, Ragavan N, Rajesh R, Jena RK, and Suraparaju SK. Analysis of PEM hydrogen fuel cell and solar PV cell hybrid model. *Mater. Today Proc* 2019;17: 246–253.
- [25] Biberici MA, and Celik MB. Dynamic Modeling and Simulation of a PEM Fuel Cell (PEMFC) during an Automotive Vehicle's Driving Cycle. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res* 2020;10(3): 5796–5802.
- [26] Jadhav D, and Thakare M. Mathematical Modeling and Simulation of a Fuel Cell in MATLAB. *SSRN Electron J* ,2022.pp.1-10.
- [27] Maaruf M, and Khalid M. Hybrid Solar/ PEM Fuel Cell/ and Water Electrolyzer Energy System for All-Electric Ship. 2022 IEEE Kansas Power Energy Conf. KPEC 2022;1-5.
- [28] Parida RK. PEM Fuel Cell based PV/Wind Hybrid Energy System. 2022 OPJU Int Technol Conf. Emerg Technol Sustain Dev OTCON 2022, 2023.pp.1–6.
- [29] Miloslav Ulichy M, and Kutis V. System Modelling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell and its Comparison at Extreme Loads. *Proc. 31st Int Conf ,Cybern, Informatics, K I, 2022* 2022–2025, 2022.
- [30] Raj J, and Rajasree SR. A Microgrid with Hybrid Solar - Fuel Cell System With CHP Application. 2022 IEEE 2nd Int. Conf. Sustain. Energy Futur. Electr. Transp. SeFeT 2022, August 2022.pp.1–6.
- [31] Abdalfatah S, Nader I, Hegazy HY, El-Kholy EE, and Awad Hybrid H. Wind/FC System Design and Simulation. 2022 23rd Int. Middle East Power Syst. Conf. MEPCON, 2022.pp.1-6.
- [32] Kumar RK, and Samuel P. Green Hydrogen Generation from the PEM Electrolyzer Powered by Solar Panel. 2023 5th Int Conf Electr Comput Commun Technol ICECCT, 2023.pp.1–6.
- [33] Dapra T, Dalmau E, Poulichet P, and Nefzaoui E. Characterization of an experimental bench for low-carbon hydrogen production, storage and conversion. *Int Conf Electr Comput. Commun Mechatronics Eng ICECCME 2023*.pp.1–5.
- [34] Energy E, Of R, In AH, Region G, Analysis PT, and Simulation B. Department of Electrical and Electronics Engineering, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep Product Development and Design Engineering, Gaziantep University, Gaziantep 2021.pp.145–159.
- [35] Banik A, Shrivastava A, Manohar Potdar R, Kumar Jain S, Gopal Nagpure S, and Soni M. Design, Modelling, and Analysis of Novel Solar PV System using MATLAB. *Mater. Today Proc* 2021;51:756–763.
- [36] Möller MC, and Krauter S. Dimensioning and Lifetime Prediction Model for a Hybrid Hydrogen-Based Household PV Energy System Using Matlab/Simulink. *Solar* 2023;3(1): 25–48.
- [37] Sharma C, Jain A, Engg C, Era G, and Uttrakhand D. Solar Panel Mathematical Modeling Using Simulink 2014;4(5): 67–72.
- [38] Pandiarajan N, and Muthu R. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink no. February 2011, 2014.
- [39] Kumari JS, and Babu CS. Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment 2012.
- [40] Nguyen XH, and Nguyen MP. Mathematical modeling of photovoltaic cell / module / arrays with tags in Matlab / Simulink. *Environ. Syst. Res*,2015.
- [41] Corrêa JM, Member S, F. Farret FA, Popov VA, Simões MG, and Member S. Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells 2005;20(1): 211–218.
- [42] Mogorosi K, Oladiran MT, and Rakgati E. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of a Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell ,2020.pp.653–670.
- [43] Qian X, Shi Z, Zhang J, and Xuan D. Measurement and control platform of the proton exchange membrane of fuel cell based on the MATLAB/Simulink June 2021.
- [44] Khan MJ, and Iqbal MT. Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, 2005.pp.97–104.
- [45] Ansari SA, et al. Modeling and Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Alongside a Waste Heat Recovery System Based on the Organic Rankine Cycle in MATLAB / SIMULINK Environment 2021.
- [46] Saleh IM, Ali R, and Zhang H. Experimental Testing and Validation of the Mathematical Model for a Self-Humidifying PEM Fuel Cell, 2018.pp.202–218.

- [47] Özdemir MT. Optimal parameter estimation of polymer electrolyte membrane fuel cells model with chaos embedded particle swarm optimization. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(30): 16465–16480.
- [48] Saleh IMM, Ali R, and Zhang H. Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack. *J Mod Power Syst Clean Energy* 2016;4(4): 668–679.
- [49] Calasan M, Abdel Aleem SHE, Hasanien HM, Alaas ZM, and Ali ZM. An innovative approach for mathematical modeling and parameter estimation of PEM fuel cells based on iterative Lambert W function. *Energy* vol. 264, no. September 2022, 2023.
- [50] Bhansali G, and Kumar R. Design analysis and dynamic control of PEM fuel cell for standalone applications 2014 IEEE Students Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS, 2014, pp.1–6.
- [51] Martín IS, Ursúa A, and Sanchis P. Modelling of PEM fuel cell performance: Steady-state and dynamic experimental validation. *Energies* 2014;7(2): 670–700.
- [52] Bankupalli PT, Ghosh S, Sahu LK, and Kumar Dwivedi A. Parameter estimation of PEM Fuel Cell Electrical Equivalent Model using Hybrid Optimization. 2019 8th Int. Conf. Power Syst. Transit. Towar. Sustain. Smart Flex. Grids, ICPS , 2019, pp.1–6.
- [53] Xie P, Araya SS, Guerrero JM, and Vasquez JC. Dynamic Modeling and Control of High Temperature PEM Fuel Cell and Battery System for Electrical Applications. *IECON Proc Industrial Electron. Conf*, 2023, pp.1–6.





## Silan Ajanları ile Modifiye Edilmiş Montmorillonit Katkılı Polimerik Kompozit Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Şükran Melda ESKİTOROS TOGAY<sup>1\*</sup>, Esma Aleyna YEŞİLYURT<sup>2</sup>, Sema ÇÖRTOĞLU<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Eczane Hizmetleri Programı, Gülhane Sağlık Meslek Yüksekokulu, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Ankara, Türkiye  
<sup>\*1</sup> melda.togay@sbu.edu.tr, <sup>2</sup> dtesmaaleyna@gmail.com, <sup>3</sup> semaacortoglu@gmail.com

(Geliş/Received: 11/01/2024;

Kabul/Accepted: 24/07/2024)

**Öz:** Bu çalışmada, dolgu maddesi olarak kullanılan montmorillonit (MMT), iki farklı silan ajanı ((3- aminopropil)trietoksisilan (APTES) ve (3-glisidoksiyopropil)trimetoksisilan (GPTMS)) ile modifiye edilmiş, organik faz ile ara yüzey etkileşiminin artırılması ve polimer matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Polimer matris olarak ise biyobozunur ve biyouyumlu özelliklere sahip sentetik polimerlerden polikaprolakton (PCL) ve biyouyumlu ve hidrofilik özelliğe sahip polivinilpirolidon (PVP) birlikte kullanılmış ve çözelti döküm yöntemiyle biyomalzemeler üretilmiştir. Kemik doku mühendisliğine yönelik doku iskelesi olarak kullanımı ön görülen biyomalzemelerin morfolojik, fizikokimyasal ve mekanik özellikleri, atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), X-ışını difraktometresi (XRD), temas açısı analizi, su absorplama kapasitesi analizi ve mekanik analiz ile karakterize edilmiştir. AFM sonuçları, PCL/PVP polimer matrisinin 0,507 µm olan pürüzlülük değerinin modifiye edilmemiş MMT'nin eklenmesiyle 0,171 µm ve MMT-APTES eklenmesiyle ise 0,160 µm değerine düştüğünü göstermiştir. Pürüzlülük oranı en yüksek GPTMS ile modifiye edilmiş MMT katkıli biyomalzemelerde 0,530 µm olarak bulunmuştur. Temas açısı değerleri ve su absorplama kapasiteleri karşılaştırıldığında, 68,4° ve 59,7° temas açısı değerleri bulunan APTES ve GPTMS ile modifiye edilmiş MMT katkıli biyomalzemelerin, MMT katılmamış biyomalzemenin daha hidrofilik olduğu ve su absorplama kapasitesinin MMT katılmamış polimer matristen ve modifiye edilmemiş biyomalzemenin %125 ve %144 olarak daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ön değerlendirme niteliğindeki bu çalışmamız ile APTES ile modifiye edilmiş MMT katkıli PCL/PVP biyomalzemelerinin kemik doku hasarlarının tedavisinde doku iskelesi olarak kullanılabilceği ön görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Montmorillonit, silan, polikaprolakton, polivinilpirolidon, doku iskelesi.

### Fabrication and Characterization of Montmorillonite Doped Polymeric Composite Films Modified with Silane Agents

**Abstract:** In this study, montmorillonite (MMT), used as filler, was modified with two different silane agents ((3-aminopropyl)triethoxysilane (APTES) and (3-glycidioxypropyl)trimethoxysilane (GPTMS)) to increase the interfacial interaction with the organic phase and ensure homogeneous distribution in the polymer matrix. As polymer matrix, polycaprolactone (PCL), a synthetic polymer with biodegradable and biocompatible properties, and polyvinylpyrrolidone (PVP), a biocompatible and hydrophilic polymer, were used together and biomaterials were produced by solution casting method. The morphological, physicochemical and mechanical properties of the biomaterials proposed for use as scaffolds for bone tissue engineering were characterized by atomic force microscopy (AFM), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffractometry (XRD), contact angle analysis, water absorption capacity analysis and mechanical analysis. AFM results showed that the roughness of the PCL/PVP polymer matrix decreased from 0.507 µm to 0.171 µm with the addition of unmodified MMT and to 0.160 µm with the addition of MMT-APTES. The highest roughness ratio was found to be 0.530 µm in GPTMS-modified MMT doped biomaterials. When contact angle values and water absorption capacities were compared, it was observed that APTES and GPTMS-modified MMT doped biomaterials with contact angles of 68.4° and 59.7° were more hydrophilic than the biomaterial without MMT and the water absorption capacity was 125% and 144% higher than the polymer matrix without MMT and the unmodified biomaterial. In conclusion, this preliminary study suggests that APTES-modified MMT doped PCL/PVP biomaterials can be used as tissue scaffolds in the treatment of bone tissue damage.

**Key words:** Montmorillonite, silane, polycaprolactone, polyvinylpyrrolidone, tissue scaffold.

#### 1. Giriş

Travmaya bağlı kırıklar, yaralanmalar veya yaşlanma ile gelişen deformasyon, ortopedik anlamda büyük bir endişe yaratmaktadır. Geleneksel kırık iyileşmesi ve kemik onarım işlemlerinin yanı sıra, karmaşık kemik rekonstrüksiyonu süreci, otogreftler veya allogreftlerin uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, otogreftler, travma komplikasyonları ve donör hastalanması ile sınırlıyken allogreftler genellikle konakçıya karşı greft reddi süreci ile sonlanabilmektedir. Bu nedenle, biyoloji, tıp ve mühendislik ilkelerini içeren kemik doku

\* Sorumlu yazar: [melda.togay@sbu.edu.tr](mailto:melda.togay@sbu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7473-8417, <sup>2</sup> 0009-0007-5708-5630, <sup>3</sup> 0009-0002-6338-5713

mühendisliği, fonksiyonel greft ikameleri yoluyla hasarlı dokuların onarımı ve değiştirilmesi için kapsam sağlayan gelişmiş bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır [1]. İdeal bir kemik dokusu implantı, öncü hücrelerin büyümesi için uygun bir matris sağlamalı ve osteojenik farklılaşma sürecine aracılık etmelidir. Ek olarak, implante edilen iskele, konak dokunun yeniden şekillenme kinetiğini takiben biyolojik sistemde bozunmalı ve emilmelidir [2].

Malzeme seçimi, doku iskele tasarımında en önemli adımlardan biridir. Son zamanlarda doku mühendisliği alanında yapılan çalışmalarda, oldukça esnek ve vücuttan atılabilen bozunma ürünleri oluşturan biyolojik olarak bozunabilen farklı polimerlerin tercih edildiği görülmüştür. Ayrıca, vücutta iltihaplanma veya toksisiteye neden olmadan biyolojik olarak emilebilir olmaları da istenilen bir diğer özelliktir [3]. Polikaprolakton (PCL), kaprolaktonun halka açılma polimerizasyonu ile hazırlanan biyobozunur alifatik bir poliesterdir [4]. Gıda ve İlaç Ajansı (FDA) tarafından onaylı olan PCL, esnek olup erime noktası 65 °C'dir. Düşük camsı geçiş sıcaklığına (-61 °C) ve oldukça uzun biyolojik bozunma süresine sahiptir [5]. Kemik doku mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir polimer olup hidrofobikliği, biyoaktif yüzeyin yokluğu ve düşük hücresel etkileşim, bu alandaki uygulamasını sınırlamaktadır [6]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla hidrofilik polimerlerle bir arada kullanılmaktadır [7]. Bu çalışmada da PCL'nin hücre davranışını ve kemik mineralizasyonunu iyileştirmek için polivinilpirolidon (PVP) ile kullanılmıştır. PVP, yüksek viskoelastik mukavemete ve farklı solventlerde iyi çözünürlüğe sahip, biyoyumlu bir polimerdir [8]. PVP; polilaktik asit (PLA), PCL, jelatin, selüloz asetat gibi diğer sentetik ve doğal polimerlerle birleştirilerek yapı iskeleleri haline getirilmiştir [7]. Daha önce kemik doku mühendisliği uygulamaları için kullanılmıştır. Sruthi ve ark. [9], kemik dokusu mühendisliği için PCL/PVP ortak eksenli elektrospun doku iskeleleri içeren veratrik asit yüklü kitosan nanoparçacıklarını üretmişlerdir. PVP, biyo-mineralizasyon iyileştirmeleri ve osteojenik potansiyel için kullanılmıştır. Sonuçlar, hazırlanan iskelelerin, alkalın fosfataz, kolajen (COL) tip I ve osteokalsin gibi kemikle ilgili belirteçlerin daha yüksek ifadesini göstermiştir. Sonuç olarak, doku iskelelerinin başta kemik doku mühendisliği olmak üzere doku mühendisliğinin farklı alanlarında da kullanılabileceği gösterilmiştir. Başka bir çalışmada Sadeghi-Avalshahr ve ark. [10], doku mühendisliği uygulamaları için COL/kitosan ile aşılana PCL/PVP iskelelerini önermiştir. PCL biyolojik olarak parçalanabilirliği, biyoyumluluğu ve uygun mekanik özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Polimerler, özellikle doku mühendisliği alanında düşük termal kararlılıkları ve zayıf mekanik özellikleri gibi kısıtlayıcı yanlarından dolayı polimer matrisi içerisine nano ölçekli dolgu maddesinin katılmasıyla elde edilen polimer kompozit yapısında kullanılırlar [11]. Kompozit üretmek için organik ve inorganik nanodolgu maddelerinin biyolojik olarak parçalanabilen polimer matrislere nano ölçekli dağılımı, gelişmiş özelliklere sahip polimerik sistemler geliştirmek için kullanılmaktadır. Polimerler ve nanoyapıların bu kombinasyonu, doku mühendisliği uygulamaları için arzu edilen mekanik ve termal özelliklere sahip malzemelere erişim imkânı vermektedir [12]. Nanomalzeme türleri arasında nanokiller, doğada bol bulunan mineraller olup ekonomik ve çevre dostu olmaları kullanım alanlarında ivme kazandırmıştır. Polimer-nanokil kompozitler, biyomedikal uygulamalarda ve doku mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanokillerin benzersiz özellikleri sayesinde, küçük yüzdelerde matrise ilavesi ile geleneksel kompozitlere kıyasla dikkate değer mekanik ve termal gelişmeler sağlamaktadır [13]. Mineralojik bileşimlerine göre, özelliklerine bağlı olarak farklı uygulamalarda kullanılan yaklaşık otuz farklı nanokil türü mevcuttur. Nanokil, birbiri üzerine yığılmış tetrahedral/oktahedral tabakalardan oluşmaktadır ve bu tabakaların düzenlenmesi kil minerallerini kaolinit, hektorit, halloysit ve montmorillonit gibi farklı sınıflara ayırmaktadır [14]. Bu nanokillerden, montmorillonit (MMT), iki tetrahedral silika tabakasından ve her iki tabaka için ortak oksijen atomları ile birbirine bağlanan merkezi bir alümina oktahedron tabakasından oluşan [15] biyolojik olarak parçalanabilen bir monoklinik silikat mineralidir. MMT, birbiri üzerine yığılmış ve su ve/veya diğer polar moleküllerin nüfuz etmesine izin veren Van der Waals kuvvetleri tarafından gevşek bir şekilde bağlanmış bir nanometre kalınlığında katmanlara sahiptir [16]. Tipik bir kil minerali olarak kemik iskelelerinin mekanik olarak güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [17]. Diğer yandan, moleküler interkalasyon ve hedefe yönelik fonksiyonel modifikasyon yoluyla, MMT'nin ilaçların veya büyüme faktörlerinin kontrollü ve sürekli salınımlarını ve kemik iskelelerinin biyofonksiyonelleşmesini gerçekleştiren bir platform oluşturması beklenmektedir [18]. Ek olarak, MMT, iyi katyon değiştirme kapasitesi, yüksek spesifik yüzey alanı, polimer molekülleri için büyük adsorpsiyon kapasitesi, yüksek şişme kapasitesi, modifikasyon kolaylığı ve ilaç taşıma kabiliyeti gibi olumlu özellikleri nedeniyle implante edilebilir biyomalzemelerle ilişkilendirilmekte [19] ve ilaç salım sistemi, ağır metal adsorpsiyonu ve doku mühendisliği gibi farklı araştırmalarda kullanılmaktadır [20].

Kil minerali doğal haliyle hidrofilik bir karaktere sahiptir ve bir polimer matrisine eklendiğinde aglomerasyon oluşturma eğilimi gösterir. Bunun nedeni, kil mineralinin yüzey enerjisinin polimerinkinden daha büyük olması ve parçacık-polimer etkileşiminden daha güçlü bir parçacık-parçacık etkileşimi oluşturmalarıdır [21]. MMT'nin polimerik matris içinde tamamen dağılmasını sağlamak için katmanların ayrı ayrı ayrılması veya pul pul dökülmesi gerekir. MMT katmanları arasındaki yüksek elektrostatik çekim kuvveti nedeniyle ve kil minerali polimerinkinden daha büyük bir yüzey enerjisine sahip olduğundan, ara katman aralığını artırmak için kil mineralinin organik olarak modifiye edilmesi gereklidir. Bu modifikasyon, polimerin, kil mineralinin ara katman boşluğu içinde araya

girmesine izin verir [16]. Bu nedenle, MMT'nin organosilanlar ile yüzey modifikasyonu ve elde edilen kil mineral-polimer kompozitleri, çevre teknolojisi, ilaç salım sistemleri ve doku mühendisliği uygulamaları gibi alanlarda büyük ilgi görmüştür [22].

Silanlama, modifiye edici bileşiğin molekülünün kil minerali katmanlarına kimyasal olarak bağlandığı ve bileşik için yeni işlevler sağladığı bir reaksiyon olup geri döndürülemez bir işlemdir. Bunun sebebi, kil mineral yüzeyi ile modifiye edici bileşiğin molekülleri arasında kovalent karakterli kimyasal bağlar oluşur [23]. Kil mineralinin yüzeyindeki suyun varlığı, yapıda bulunan silikon atomlarının yüzeyde adsorbe edilen hidroksil grupları ile kimyasal olarak bağlanmasına izin vererek silanol oluşumuna neden olur [24]. Kil mineralinin farklı silan türleri ile modifikasyonunu araştıran çalışmalar mevcut olup bu çalışma kapsamında en sık kullanılan (3-aminopropil)trietoksisilan (APTES) ve (3-glisidoksi)propiltrimetoksisilan (GPTMS) ile çalışılmıştır. Vuppaladadium ve ark., APTES' i en yaygın kullanılan silan öncüllerinden biri olduğunu ve hidroksiapatit, titanyum dioksit vb. içeren farklı biyomalzemelerin/yüzeylerin işlevselleştirilmesi için rutin olarak kullanıldığı için grafen oksidi (GO) silanlaştırmak amacıyla kullanmıştır. Silan ile işlevleştirilen GO'nun (SiGO) primer insan dermal fibroblast, murin embriyonik fibroblast ve insan osteosarkom hücre hatları olmak üzere üç farklı hücre hattı üzerindeki *in vitro* toksisitesinin incelenmesi ile SiGO'nun toksisitesinin GO'dan önemli ölçüde daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Ek olarak, SiGO, GO'ya kıyasla sitouyumlulukta iyileşme göstermiştir. SiGO, insan mezenkimal kök hücrelerinin osteojenik farklılaşmasını indüklemiş ve fare modelinde sistemik toksisitede azalma göstermiştir. Sonuçta, silanizasyon GO'nun biyoyumuluğunu geliştirmiştir [25]. Bir başka çalışmada, Verma ve ark., halloysit nanotüp kil minerallerini (HNT) sülfürik asit kullanılarak aşındırılmış ve ilaç moleküllerinin HNT yüzeyleriyle daha iyi etkileşime girmesi amacıyla (3-aminopropil) trietoksisilan (APTES) kullanılarak işlevselleştirilmişlerdir. Ardından, penisilin grubundan olan Augmentin, HNT'lere yüklenmiş ve antibakteriyel özellikleri, sitotoksitesi ve kümülatif ilaç salımı (%) değerlendirilmiştir. XRD ve FT-IR analizleri, Augmentin'in APTES@Asit HNT'lere yüklendiğini doğrulamıştır. İlaç enkapsülasyon verimliliği %40,89'u olarak bulunmuştur. Ayrıca, MTT testi ile Augmentin yüklü APTES@Asit HNT'ler, *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı iyi antibakteriyel özellik ve düşük sitotoksite sergilemiştir [26].

Bu bilgiler ışığında, üretilen malzemelerin fizikokimyasal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, doğal kemiğin özel kimyasal konfigürasyonu ve hiyerarşik yapısına dayanarak çeşitli nanoparçacıkların eklenmesi, doğal kemiğin inorganik bileşenleriyle benzerliklerinin bir sonucu olarak ideal seçenekler sunabilmektedir. Bu kapsamda, bu çalışmanın amacı, iki farklı silan ajanı ile modifiye edilen montmorillonit katkılı PCL/PVP polimer kompozitlerinin üretilmesi, karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi ve üretilen filmlerin kemik dokusu mühendisliği çalışmaları için doku iskelesi olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesidir. Üretilen iskelelerin *in vitro* hücre davranışı üzerindeki etkisini izlemek için ileri çalışmalar devam etmektedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Nanokil modifikasyonu

Belirli miktarda nanokil, 60 °C'de bir gün boyunca vakumlu etüvde kurutulmuştur. 100 mL etanol/su karışımına kurutulmuş MMT disperse edilerek 80 °C'de en az 8 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Diğer tarafta, APTES ve GPTMS, 10 mL etanol/su karışımında ayrı ayrı karıştırılmış ve çok yavaş yavaş MMT dispersiyonuna ayrı ayrı eklenmiştir. Modifikasyon için karışımlar en az 5 saat 80 °C'de karıştırılmıştır. En son basamakta reaksiyon ürünü süzülmüş ve etanol/su karışımı ile tekrar tekrar yıkanmıştır. APTES ve GPTMS ile modifiye edilen MMT, 6-8 saat 80 °C'de vakumlu etüvde kurutulmuştur [16, 27-29].

### 2.2. Biyomalzemelerin üretilmesi

PCL/PVP biyomalzemesi, 10 mL'lik 8/2 (v/v) oranlarında hazırlanan diklorometan (DCM)/N,N-dimetilformamid (DMF) çözücüsünde %10 (w/v) PCL ve %2 (w/v) PVP çözeltilerinden 1/1 (v/v) oranında katılarak 24 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılarak hazırlanmıştır. MMT, MMT-APTES ve MMT-GPTMS içeren kompozit biyomalzemeleri için öncelikle 5 mL'lik DCM/DMF çözücü karışımında PCL/PVP çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından ayrı bir tarafta kütlece polimer oranına göre %0,3 oranında MMT, MMT-APTES ve MMT-GPTMS, aynı çözücü karışımında ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır [30]. Daha sonra polimer ve kil çözeltileri birleştirilerek 24 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve hazırlanan çözeltiler ayrı ayrı 13 cm çaplı petri kaplarına dökülerek oda sıcaklığında 2 gün boyunca kurumaya bırakılmıştır.

### 2.3. Karakterizasyon çalışmaları

Saf MMT'nin, APTES ve GPTMS ile modifiye edilmiş MMT'nin ve polimer-kil biyomalzemelerinin FT-IR spektrumları, 4000-500  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki dalga sayısı spektrumunda ve 4  $\text{cm}^{-1}$  çözünürlükte Thermo Fisher Scientific, Inc., (Waltham, MA, ABD) marka Nicolet Avatar 370 Spektrometre cihazı ile çalışılarak elde edilmiştir. Kırınım desenleri, 25 °C'de 40 kV ve 30 mA parametrelerinde, 1°/s tarama hızıyla kil mineralleri için 2 $\theta$  açısı değeri 2-20° aralığında ve polimer-kil biyomalzemeleri için ise 0-50° aralığında APD 2000 PRO difraktometre cihazı (GNR, USA) ile çalışılmıştır. Yüzey topografisi, 25 °C' de, 0,5 Hz tarama hızında ve 25 x 25  $\mu\text{m}^2$  alanında AFM XE-100 Park Systems Corp. (Suwon, Kore) marka cihaz ile SmartScan programı kullanılarak elde edilmiştir. Biyomalzemelerin ıslanabilirlik özelliği, 25 °C' de deiyonize su kullanılarak sessile drop metodu ile Krüss DSA 100 (Almanya) marka cihazda çalışılmıştır. Su absorplama kapasiteleri içinse öncelikle numunelerin kuru ağırlıkları tartılıp ( $W_d$ ) kaydedilmiştir. Daha sonra 37 °C'de, pH 7,4 fosfat tampon çözeltisine daldırılan numunelerin ağırlıkları ( $W_w$ ) 24 ve 48. saatlerde tartılarak aşağıdaki Denklem (1) ile hesaplanmıştır [31]:

$$\text{Su absorplama kapasitesi (\%)} = \left( \frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

Biyomalzemelerin mekanik mukavemetinin analiz edilmesi için numuneler 6x2  $\text{cm}^2$  boyutlarında kesilerek üst ve alttan iki mengene arasına sıkıştırılmıştır. Numunelere çekme testi (Model AGS-J, Shimadzu, Japonya) uygulanmış ve çekme-dayanım grafiklerine göre kopma mukavemetleri elde edilmiştir.

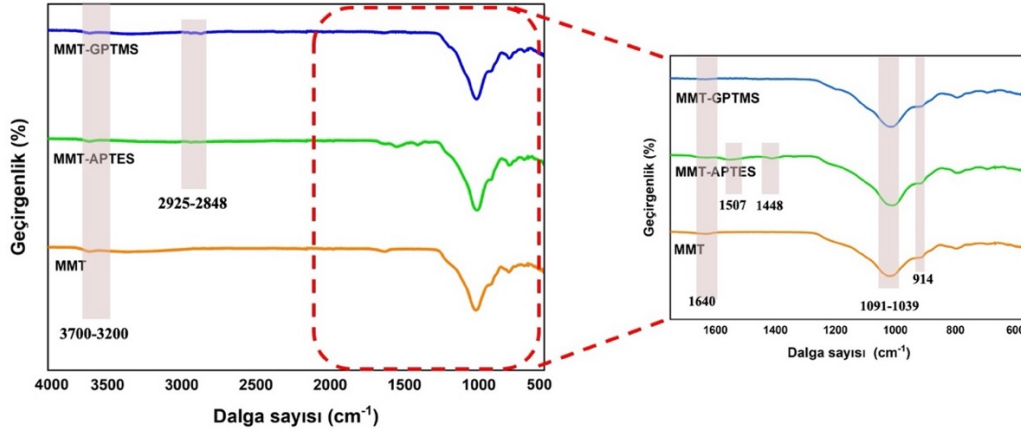
## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Kil minarelleri

#### 3.1.1. FT-IR analizi

Geliştirilmiş özelliklere sahip kil-polimer kompozitlerini üretmek için, kil nanotabakalarının polimer matris boyunca geniş bir dağılımının yanı sıra fazlar arasında iyi ara yüzey etkileşimlerine de ihtiyaç vardır. Bu nedenle, kil nano katmanlarının modifikasyonu, termal olarak stabil silan birleştirme maddelerinin kil plakaları üzerine kimyasal olarak aşılmasını kapsayan kimyasal işlevselleştirme gibi ara katman boşluklarının boyutunu arttırmak için çok önemlidir [32].

Kilin yüzey modifikasyonu FT-IR ile gerçekleştirilen fonksiyonel grup analizi ile incelenmiştir. Saf MMT ile APTES ve GPTMS ajanlarıyla modifiye edilmiş MMT killerinin spektrumları Şekil 1'de verilmiştir. FT-IR sonuçları, 3700–3200  $\text{cm}^{-1}$  bölgesindeki (-OH) gruplarının titreşimlerini ortaya koyarken, 1300–440  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde silanol (Si-O) fonksiyonel gruplarının gerilmesine karşılık gelen bantlar gözlenmiştir.  $\text{Al}^{+3}$  kanyonları (Al-Al-OH) ile koordineli hidroksil gruplarının (-OH) titreşimi nedeniyle tüm killerde 3613-3621  $\text{cm}^{-1}$  civarında karakteristik bir bant gözlenmiştir. 3625  $\text{cm}^{-1}$ 'deki bant genişliği,  $\text{Al}^{+3}$  oktahedral tabakasında  $\text{Fe}^{+2}$  (Al-Fe-OH) veya  $\text{Mg}^{+2}$  (Al-Mg-OH) ile izomorfik bir yer değiştirmeyi göstermektedir. 3400  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki geniş bant, kil ara katman boşluklarına adsorbe edilen su moleküllerinin hidroksil grubunun (-OH) gerilmesine karşılık gelmektedir. Ek olarak, 1091-1039  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki çok yoğun bant, tetrahedral tabakaya karşılık gelen (Si-O) gerilme titreşimlerine atfedilmektedir. 519 ve 466  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki bantlar, montmorillonitin Al-O gerilmesi ve Si-O bükülme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır [33]. 2925  $\text{cm}^{-1}$ 'de ortaya çıkan yeni bant, üretilen filmde APTES'in varlığına işaret eden  $\text{CH}_2$  asimetrik gerilmesine atfedilebilir. Diğer yeni zirveler 1507  $\text{cm}^{-1}$  (N-H simetrik esneme), 1448  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$  asimetrik esneme), 1414  $\text{cm}^{-1}$  (C-H esneme), 697  $\text{cm}^{-1}$  (O-Si-O asimetrik esneme) [34], 1562  $\text{cm}^{-1}$  ( $-\text{NH}_3^+$  simetrik esneme) APTES'in kil ile modifiye edildiğini göstermektedir.

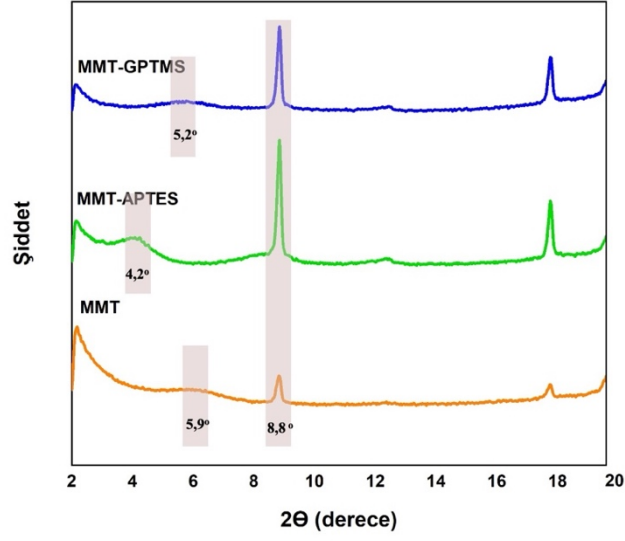


Şekil 1. Modifiye edilmemiş/edilmiş killerin FT-IR spektrumları.

Şekil 1'e göre, APTES/GPTMS ile modifiye edilmiş nanokil parçacıklarının spektrumları, silan birleştirme maddelerinin yanı sıra modifiye edilmemiş nanokil parçacıklarının spesifik piklerini de sergilemiştir. MMT'nin silan ajanları ile modifikasyonundan sonra, sırasıyla  $-CH_2$  asimetrik ve simetrik gerilme titreşimleri nedeniyle  $2933\text{ cm}^{-1}$  ve  $2865\text{ cm}^{-1}$ 'deki ek pikler izlemiştir. C-H alifatik zirvesi silan ajanlarından sonra ortaya çıkmış ve bu da silan moleküllerinin ve kilin SiC-O-SiC sayesinde bağlandığını kanıtlamıştır [33]. Ayrıca Raji ve ark. (2018),  $1553\text{ cm}^{-1}$ 'deki  $NH_2$  titreşimindeki deformasyonun MMT-APTES spektrumunda meydana geldiğini ifade etmiştir.  $NH_2$  gerilmesiyle örtüşmesi nedeniyle, APTES ile yapılan modifikasyondan sonra OH gerilme pikinde bir uzama gözlenmiştir [35]. FT-IR spektrumunda yaklaşık  $690\text{ cm}^{-1}$ 'deki N-H zirvesinin görünümü, silan moleküllerinin MMT yüzeylerine fiziksel veya kimyasal aşılınması için destekleyici kanıt sağlamıştır. Diğer taraftan, GPTMS'nin FT-IR eğrisinde  $CH_3$  ve  $CH_2$  tepe noktalarının simetrik uzaması ve epoksi halka titreşimi sırasıyla  $2926\text{ cm}^{-1}$ ,  $2869\text{ cm}^{-1}$  ve  $1254\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenmiştir. MMT'nin GPTMS ile modifikasyonundan sonra -OH bandının yoğunluğu azalmıştır. Bu durum da modifikasyon ile silan moleküllerinin katıldığını göstermektedir. Ek olarak,  $2940$ ,  $1471$  ve  $1390\text{ cm}^{-1}$ 'deki yeni zirveler, sırasıyla  $CH_2$ 'nin titreşim uzamasına,  $CH_2$  ve  $CH_3$ 'ün titreşim bükülmesine atıfta bulunarak silandaki epoksi gruplarını oluşturur. Bu zirveler, modifiye edilmiş kilde GPTMS'nin varlığını göstermiştir.  $3455\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik emilimi, silanol gruplarını (Si-OH) oluşturmak için hidroksil gruplarının tüketilmesi nedeniyle azalmıştır. Bu sonuç ile montmorillonitin silan (GPTMS) tarafından başarıyla modifiye edildiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle nanokiller APTES ve GPTMS silan birleştirme ajanları ile etkili bir şekilde modifiye edilmiştir.

### 3.1.2 XRD analizi

Kristal yapıyı ve ara katmanlarındaki değişimi araştırmak için, üç kil minerali üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Saf MMT'nin ve APTES ve GPTMS ajanları tarafından modifiye edilmiş MMT'nin XRD sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Saf MMT,  $2\theta = 5,9, 8,8, 12,4, 17,8, 19,8^\circ$ 'de bir kırınım zirvesi sergilemiştir. XRD deseni, MMT'nin tipik bir yansımasını göstermektedir. Bu da montmorillonitin dioktahedral bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir [33]. Saf MMT için  $1,48\text{ nm}$ 'lik bir bazal boşluğa karşılık gelen pik,  $5,9^\circ$ 'de gözlenmiştir. Ancak MMT-APTES ve MMT-GPTMS'nin bazal boşluk değerlerinin sırasıyla  $2,12\text{ nm}$ 'ye ( $2\theta = 4,2^\circ$ ) ve  $1,69\text{ nm}$ 'ye ( $2\theta = 5,2^\circ$ ) yükseldiği bulunmuştur. Diğer bir ifadeyle MMT-APTES ve MMT-GPTMS de ara katmanlar arası mesafe artmıştır. Bu durumda, MMT-APTES ve MMT-GPTMS'in yüzey modifikasyonlarının MMT'nin kristal yapısını değiştirmediklerini [36] ve yalnızca MMT'in yüzey özelliklerini değiştirdiklerini göstermiştir. Bazal aralıktaki genişleme, silan ajanlarının, daha önce Hua ve ark. tarafından raporlandığı gibi, modifiye edilmemiş kil minerallerinin katmanlarına ve MMT'nin genişletilmiş ara katman boşluklarına başarılı bir şekilde dahil edildiğini göstermiştir [37].

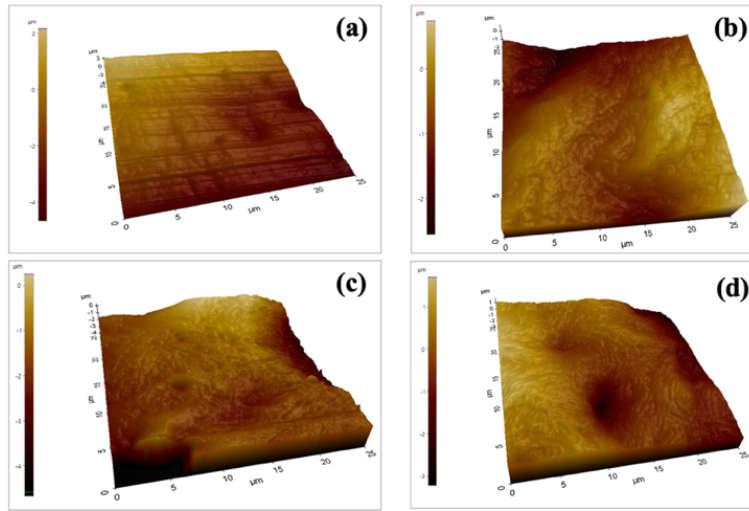


Şekil 2. Modifiye edilmemiş/edilmiş killerin XRD sonuçları.

## 3.2. Filmler

### 3.2.1. AFM analizi

PCL/PVP, PCL/PVP/MMT, PCL/PVP/MMT-APTES ve PCL/PVP/MMT-GPTMS filmlerine ait AFM görüntüleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Üretilen biyomalzemeler için elde edilen pürüzlülük değerleri sırasıyla PCL/PVP için 0,507  $\mu\text{m}$ , PCL/PVP/MMT için 0,171  $\mu\text{m}$ , PCL/PVP/MMT-APTES için 0,160  $\mu\text{m}$  ve PCL/PVP/MMT-GPTMS için 0,530  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. PCL/PVP' nin pürüzlülük parametresi PCL/PVP/MMT ve PCL/PVP/MMT-APTES filmlerine göre daha yüksek bulunurken PCL/PVP/MMT-GPTMS filmine göre daha düşüktür. MMT ve MMT-APTES ilavesiyle pürüzlülüğün azalması, PCL/PVP matrislerinde kil dağılımının iyi olduğunu göstermektedir. Ancak GPTMS ile yapılan modifikasyondan sonra yüzey daha pürüzlü hale gelmiştir. Bu durum, yüzeydeki kil agregatlarından kaynaklanıyor olabilir [38].

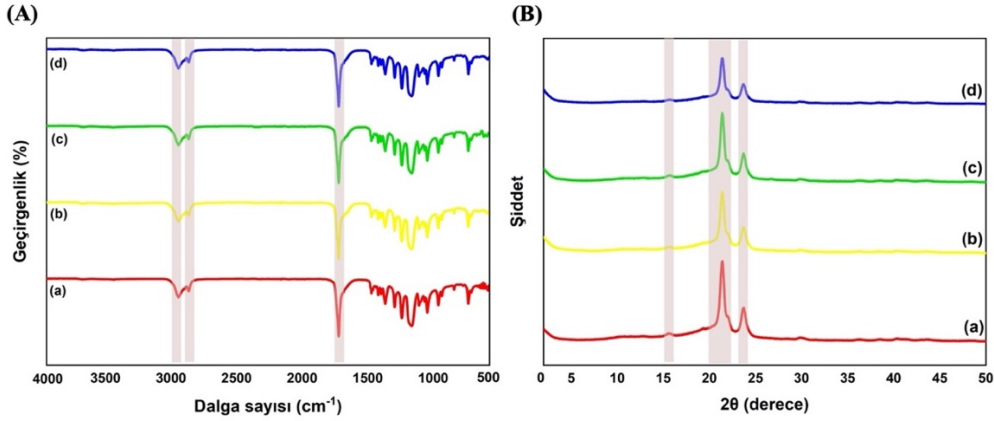


Şekil 3. AFM görüntüleri (a) PCL/PVP, (b) PCL/PVP/MMT, (c) PCL/PVP/MMT-APTES ve (d) PCL/PVP/MMT-GPTMS.

### 3.2.2. FTIR ve XRD analizleri

Kompozit filmlerin spektrumlarında (Şekil 4(A)), PCL'nin spesifik pikleri (asimetrik CH<sub>2</sub> gerilmesi için 2947 cm<sup>-1</sup>'de, simetrik CH<sub>2</sub> gerilmesi için 2870 cm<sup>-1</sup>, C=O karbonil için 1730 cm<sup>-1</sup>'de ve 1172 cm<sup>-1</sup> simetrik C-O-C germe için) ve PVP'nin karakteristik pikleri (C-H asimetrik için 2955 ve 2924 cm<sup>-1</sup> ve simetrik germe için 2894 cm<sup>-1</sup>, C=O gerilme titreşimi için 1646 cm<sup>-1</sup>, C-N gerilme titreşimleri 1494 cm<sup>-1</sup>, CH<sub>2</sub> grubunun CH deformasyonu ise 1461 ve 1422 cm<sup>-1</sup>, C-H bükülmesi 1373 ve 1318 cm<sup>-1</sup>, N-vinilpirolidon halkasındaki C-N gerilmesi ise 1287 ve 1274 cm<sup>-1</sup>, zayıf olan CH<sub>2</sub> bükülmesi 1229 ve 1170 cm<sup>-1</sup> ve C-H bükülmesi için 1075 cm<sup>-1</sup>), PCL/PVP membranlarında gözlenmiştir. MMT-APTES'in ve MMT-GPTMS'nin polimer matrisine dahil edilmesi durumunda, -CH<sub>2</sub> ve Si-CH gerilme titreşimleri sırasıyla 2923 cm<sup>-1</sup> ve 1323 cm<sup>-1</sup>'de gözlenmiştir. Bu nedenle polimerlerin ve modifiye edilmemiş/edilmiş MMT kollarının spesifik pikleri, PCL/PVP, PCL/PVP/MMT, PCL/PVP/MMT-APTES ve PCL/PVP/MMT-GPTMS kompozit membranlarının FT-IR spektrumlarında da görülmüştür.

PCL/PVP, PCL/PVP/MMT, PCL/PVP/MMT-APTES ve PCL/PVP/MMT-GPTMS biyomalzemelerinin XRD sonuçları Şekil 4(B)'de gösterilmektedir. PCL için sırasıyla 21,5° ve 23,8°'deki (110) ve (200) düzlemleri gözlenmiştir [39]. Polimerlerin tipik kırınım tepe noktalarının yoğunluğu, polimerlerin kristallikliğindeki azalmaya bağlı olarak MMT'den sonra keskin bir şekilde azalmıştır [40].



Şekil 4. Filmlerin (A) FT-IR spektrumları (a) PCL/PVP, (b) PCL/PVP/MMT, (c) PCL/PVP/MMT-APTES ve (d) PCL/PVP/MMT-GPTMS, (B) XRD sonuçları (a) PCL/PVP, (b) PCL/PVP/MMT, (c) PCL/PVP/MMT-APTES ve (d) PCL/PVP/MMT-GPTMS.

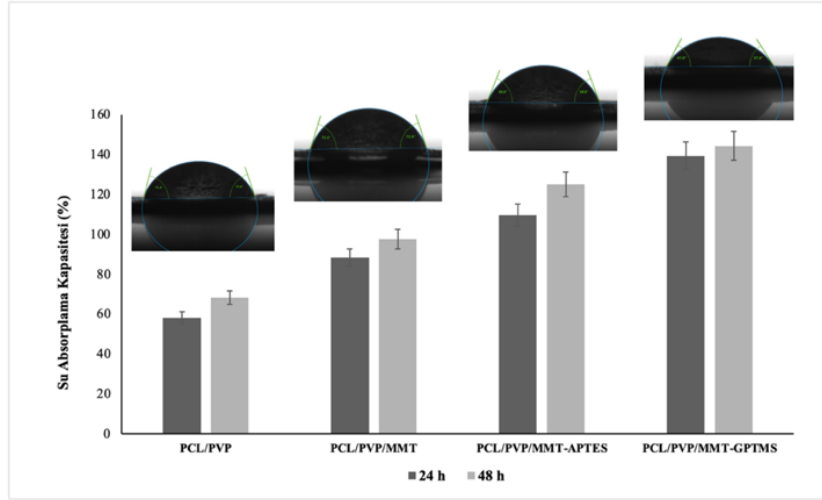
### 3.2.3. Temas açısı ve su absorplama kapasitesi

Kemik doku mühendisliği için kullanılacak film yüzeylerinin hidrofilik/hidrofobik yapısı, hücre yapışmasında ve çoğalmasında kritik bir rol oynamaktadır. Düşük temas açısı değeri, yüzeyin daha fazla hidrofilik olduğunu göstermektedir. PCL hidrofobik bir polimerdir [4]; ancak PVP ise oldukça hidrofildir [41].

Şekil 5'te verilen temas açısı değerleri sırasıyla PCL/PVP filmi için 74,2°, PCL/PVP/MMT filmi için 72,5°, PCL/PVP/MMT-APTES filmi için 68,4° ve PCL/PVP/MMT-GPTMS filmi için ise 59,7° olarak bulunmuştur. Su absorplama kapasiteleri 24 saatte PCL/PVP filmi için %58, PCL/PVP/MMT filmi için %88, PCL/PVP/MMT-APTES filmi için %110 ve PCL/PVP/MMT-GPTMS filmi için ise %139 olarak bulunmuştur. 48 saatin sonunda ise sırasıyla %68, %98, %125 ve %144 olarak bulunmuştur.

Polimer matrisine MMT, MMT-APTES ve MMT-GPTMS eklenmesiyle temas açısı değerlerinde düşme gözlenmiştir. MMT yüzeyindeki hidroksil grupları sayesinde hidrofilik karakter göstermektedir. Böylece filmlerin hidrofilikliği de artmıştır [42]. Su absorplama kapasiteleri karşılaştırıldığında ise temas açısı değerleri ile benzer sonuçlar gözlenmiştir. PCL/PVP matrisine APTES ve GPTMS modifiyeli MMT'nin eklenmesi ile su absorplama kapasitesi 24 saat sonunda PCL/PVP filmine göre sırasıyla yaklaşık olarak %188 ve %239 oranında artmıştır. 48 saatin sonunda ise artış daha da fazla olmuştur.



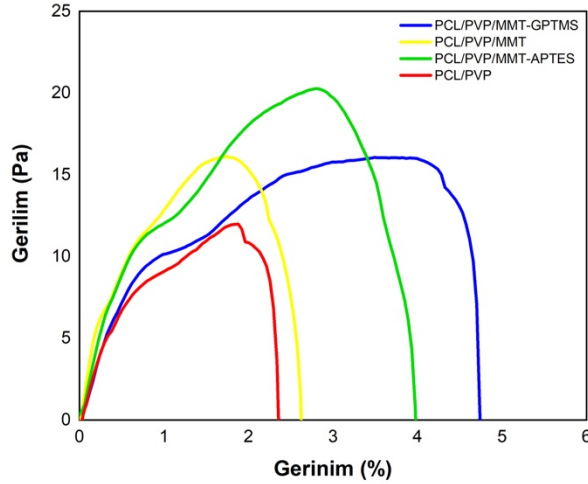


Şekil 5. Temas açı değerleri ve su absorplama kapasite.

### 3.2.4. Mekanik analiz

Polimerik matrislerde dolgu maddesi olarak kullanılan nano takviyeler mekanik davranışları arttırdıkları için tercih edilirler [43]. Takviye elemanlarının polimerik matrislere dahil edilmesi, nano takviye ve matris arasındaki arayüzey etkileşimleri yeterli olduğundan, uygulanan yükün büyük bir bölümünü stres parametreleri altında polimerik matrise taşıma kapasitesini kolaylaştırır [44].

Çekme-dayanım testi ile modifiye edilmemiş ve modifiye edilmiş kil katkılı biyomalzemelerin mekanik özellikleri incelenmiş ve sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Filmleri sırasıyla mekanik mukavemetleri PCL/PVP için 12 Pa, PCL/PVP/MMT için 15,4 Pa, PCL/PVP/MMT-APTES için 19,8 Pa ve PCL/PVP/MMT-GPTMS için ise 15,3 Pa olarak bulunmuştur. Gerilme dirençleri karşılaştırıldığında modifiyesiz/modifiyeli kil katılmamış saf malzemenin en düşük çıkmıştır. Modifiye edilmemiş kil katkılı malzemede (PCL/PVP/MMT) biraz daha yükselmiş olsa da en yüksek değer MMT-APTES katkılı doku iskelesinde gözlenmiştir.



Şekil 6. Mekanik analiz sonuçları.

## 4. Sonuç

Bu çalışmada, modifiye edilmemiş montmorillonit (MMT) ile APTES ve GPTMS ajanları ile modifiye edilmiş montmorillonit katkılı PCL/PVP film biyomalzemeleri çözelti döküm yöntemi ile üretilmiştir. MMT'nin APTES ve GPTMS ile modifikasyonu FTIR ve XRD analizleri ile karakterize edilmiştir. FTIR analizi ile silan ajanlarına ait spesifik piklerin varlığı kanıtlanmış ve XRD analizi ile MMT'nin bazal aralığındaki genişlemesi silan ajanlarının modifiye edilmemiş kil minerallerinin katmanlarına ve MMT'nin genişletilmiş ara katman

boşluklarına başarılı bir şekilde dahil edildiğini kanıtlanmıştır. Hazırlanan filmlerin FTIR analiz sonuçlarında, polimerlerin, modifiye edilmiş ve edilmemiş MMT'nin spesifik pikleri gözlenmiştir. AFM analizi ile yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde PCL/PVP polimer matrisine MMT ile MMT-APTES eklenmesi ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ancak MMT-GPTMS eklenmesi ile nanokil agregatlarının oluşmasından kaynaklı pürüzlülükte artış olduğu görülmüştür. Temas açısı değerleri karşılaştırıldığında ise kilin katılması ile PCL/PVP filminin temas açısı değerinde düşme gözlenmiştir. Modifiye nanokillerin katılması ile temas açısı değerleri PCL/PVP ve PCL/PVP-MMT filmlerine göre daha da düşerek filmlerin hidrofiliğinde artış gözlenmiştir. Su absorplama değerleri ise temas açısı sonuçları ile benzerlik göstermiş olup polimer matrisine modifiyesiz ve modifiyeli nanokilin katılması ile filmlerin 24 ve 48. saatlerdeki su absorplama değerleri yükselmiştir. Sonuç olarak, APTES ile modifiye edilmiş MMT katkılı PCL/PVP biyomalzemelerinin kemik doku hasarlarının tedavisinde doku iskelesi olarak kullanılabilirliği morfolojik, fizikokimyasal ve mekanik olarak değerlendirilmiştir. Üretilen malzemelerin in vitro hücre davranışı üzerindeki etkisini izlemek için ileri çalışmalar devam etmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından 1919B012214355 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Şükran Melda Eskitoros-Togay, fikir sahibi, sonuçları yorumladı, makaleyi yazdı. Esmâ Aleyna Yeşilyurt ve Sema Çörtoğlu deneyleri gerçekleştirdi.

## Kaynaklar

- [1] Khan Y, Yaszemski MJ, Mikos AG, Laurencin CT. Tissue engineering of bone: material and matrix considerations. *J Bone Jt Surg* 2008; 90: 36-42.
- [2] Porter JR, Ruckh TT, Popat KC. Bone tissue engineering: a review in bone biomimetics and drug delivery strategies. *Biotechnol Prog* 2009; 25(6): 1539-1560.
- [3] Langer R, Tirrell DA. Designing materials for biology and medicine (Review). *Nature* 2004; 428(6982): 487-492.
- [4] Eskitoros-Togay ŞM, Bulbul YE, Tort S, Korkmaz Demirtaş F, Acartürk F, Dilsiz N. Fabrication of doxycycline-loaded electrospun PCL/PEO membranes for a potential drug delivery system. *Int J Pharm* 2019; 565: 83-94.
- [5] Eskitoros-Togay ŞM, Bulbul YE, Dilsiz N. Controlled release of doxycycline within core/shell poly (ε-caprolactone)/poly(ethylene oxide) fibers via coaxial electrospinning. *J Appl Polym Sci* 2020; e49273: 1-12.
- [6] Ghorbani F, Sahranavard M, Zamanian A. Immobilization of gelatin on the oxygen plasma-modified surface of polycaprolactone scaffolds with tunable pore structure for skin tissue engineering. *J Polym Res* 2020; 27: 1-12.
- [7] Ning W, Shang P, Wu J, Shi X, Liu S. Novel amphiphilic, biodegradable, biocompatible, thermo-responsive ABA triblock copolymers based on PCL and PEG analogues via a combination of ROP and RAFT: Synthesis, characterization, and sustained drug release from self-assembled micelles. *Polym* 2018; 10(2): 214.
- [8] Mishra R, Varshney R, Das N, Sircar D, Roy P. Synthesis and characterization of gelatin-PVP polymer composite scaffold for potential application in bone tissue engineering. *Eur Polym J* 2019; 119: 155-168.
- [9] Sruthi R, Balagangadharan K, Selvamurugan N. Polycaprolactone/polyvinylpyrrolidone coaxial electrospun fibers containing veratric acid-loaded chitosan nanoparticles for bone regeneration. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2020; 193: 111110.
- [10] Sadeghi-Avalshahr AR, Nokhasteh S, Molavi AM, Mohammad-Pour N, Sadeghi M. Tailored PCL scaffolds as skin substitutes using sacrificial PVP fibers and collagen/chitosan blends. *Int J Mol Sci* 2020; 21(7): 2311.
- [11] Mittal V. Nanocomposites with biodegradable polymers: synthesis, properties, and future perspectives. *Oxford Scholarship Online*, 2011.
- [12] Mkhabela V, Rat SS. Biodegradation and bioresorption of poly(ε-caprolactone) nanocomposite scaffolds. *Int J Biol Macromol* 2015; 79: 186-192.
- [13] Donmez F, Kandemir AC, Can HK. Biocompatible nanocomposite production via nanoclays with diverse morphology. *Int J Polym Anal Charact* 2022; 27(3): 158-179.
- [14] Khatoon N, Chu MQ, Zhou CH. Nanoclay-based drug delivery systems and their therapeutic potentials. *J Mater Chem B* 2020; 2020: 1-19.
- [15] Jayrajsinh S, Shankar G, Agrawal YK, Bakre L. Montmorillonite nanoclay as a multifaceted drug-delivery carrier: A review. *J Drug Deliv Sci Technol* 2017; 39: 200-209.
- [16] Bertuoli PT, Piazza, D, Scienza, LC, Zattera, AJ. Preparation and characterization of montmorillonite modified with 3-aminopropyltriethoxysilane. *Appl Clay Sci* 2014; 87: 46-51.
- [17] Peña-Parás L, Sánchez-Fernández JA, Vidaltamayo R. Nanoclays for biomedical applications, in handbook of ecomaterials. Springer International Publishing, 2019.
- [18] Li DY, Li P, Xu Y, Guo WM, Li MQ, Chen MG, Wang HY, Lin HM. Progress in montmorillonite functionalized artificial bone scaffolds: intercalation and interlocking, nanoenhancement, and controlled drug release. *J Nanomater* 2022; 2022(1): 1-20.
- [19] Aguzzi C, Cerezo P, Viseras C, Caramella C. Use of clays as drug delivery systems: possibilities and limitations. *Appl Clay Sci* 2007; 36(1-3): 22-36.

- [20] Demir AK, Elçin AE, Elçin YM. Strontium-modified chitosan/montmorillonite composites as bone tissue engineering scaffold. *Mat Sci Eng-C* 2018; 89: 8-14.
- [21] Zulfiqar S, Kausar A, Rizwan M, Sarwar MI. Probing the role of surface treated montmorillonite on the properties of semi-aromatic polyamide/clay nanocomposites. *Appl Surf Sci* 2008; 255: 2080–2086.
- [22] Su L, He H, Zhu J, Yuan P. Locking effect: A novel insight in the silylation of montmorillonite surfaces. *Mater Chem Phys* 2012; 136 (2–3): 292-295.
- [23] Wypych F. Chemical modification of clay surfaces. In: Wypych F, Satyanarayana KG (eds) *Clay surfaces: fundamentals and applications*, Elsevier, Amsterdam, 2004, pp. 1–56.
- [24] Xie Y, Hill CAS, Xiao Z, Militz H, Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Compos – A* 2010; 41: 806–819.
- [25] Vuppaladadiam SSR, Agarwal T, Kulanthaivel S, Mohanty B, Barik CS, Maiti TK, Banerjee I. Silanization improves biocompatibility of graphene oxide. *Mater Sci Eng-C* 2020; 110: 110647.
- [26] Verma D, Okhawilai M, Senthilkumar N, Subramani K, Incharoensakdi A, Raja GG, Uyama H. Augmentin loaded functionalized halloysite nanotubes: A sustainable emerging nanocarriers for biomedical applications. *Environ Res* 2024; 242: 117811.
- [27] He H, Duchet J, Galy J, Gerard JF. Grafting of swelling clay materials with 3-aminopropyltriethoxysilane. *J Colloid Interface Sci* 2005; 288: 171–176.
- [28] He W, Yao Y, He M, Kai Z, Long L, Zhang M, Qin S, Yu J. Influence of Reaction Conditions on the grafting pattern of 3-Glycidoxypropyl trimethoxysilane on montmorillonite. *Bull Korean Chem Soc* 2013; 34(1): 112-116.
- [29] Shen W, He H, Zhu J, Yuan P, Frost RL. Grafting of montmorillonite with different functional silanes via two different reaction systems. *J Colloid Interface Sci* 2007; 313: 268–273.
- [30] Bulbul YE, Okur M, Demirtaş Korkmaz F, Dilsiz N. Development of PCL PEO electrospun fibrous membranes blended with silane-modified halloysite nanotube as a curcumin release system. *Appl Clay Sci* 2020; 186: 105430–105444.
- [31] Olad A, Hang HBK, Mirmohseni A, Azhar FF. Graphene oxide and montmorillonite enriched natural polymeric scaffold for bone tissue engineering. *Ceram Int* 2019; 45(12): 15609-15619.
- [32] Asgari M, Sundararaj U. Silane functionalization of sodium montmorillonite nanoclay: The effect of dispersing media on intercalation and chemical grafting. *Appl Clay Sci* 2018; 153: 228-238.
- [33] Saputra OA, Pujiasih S, Rizki VN, Nurhayati B, Pramono E, Purnawan C. Silylated-montmorillonite as co-adsorbent of chitosan composites for methylene blue dye removal in aqueous solution. *Commun Sci Technol* 2020; 5(1): 45-52.
- [34] Su L, Tao Q, He H, Zhu J, Yuan P, Zhu R. Silylation of montmorillonite surfaces: Dependence on solvent nature. *J Colloid Interface Sci* 2013; 391(0):16–20.
- [35] Raji M, Mekhzoum MEM, Rodrigue D, Bouhfid R. Effect of silane functionalization on properties of polypropylene/clay nanocomposites. *Compos B Eng* 2018; 146: 106-115.
- [36] Atmaja L, Purwanto M, Salleh MT, Mohamed MA, Jaafar J, Ismail AF, Santoso M, Widiastuti N. GPTMS-Montmorillonite-filled biopolymer chitosan membrane with improved compatibility, physicochemical, and thermal stability properties. *Mal J Fund Appl Sci* 2019; 15: 492–497.
- [37] Hua Q, Jing B, He M, Sun P, Zhao Q, Su S, Hu G, Pinh D ve diğerleri. Preparation of modified montmorillonite/graphene oxide composites to enhance the anticorrosive performance of epoxy coatings. *J Coat Technol Res* 2023; 20: 1111–1119.
- [38] Qaiss A, Bouhfid R, Essabir H. Characterization and use of coir, almond, apricot, argan, shells, and wood as reinforcement in the polymeric matrix in order to valorize these products. *Agri Biomass Based Potent Mater* 2015; 305-339.
- [39] Eskitoros-Togay ŞM, Bulbul YE, Dilsiz N. Combination of nano-hydroxyapatite and curcumin in a biopolymer blend matrix: Characteristics and drug release performance of fibrous composite material systems. *Int J Pharm* 2020; 590: 119933-119941.
- [40] Liu C, Wong H, Yeung K, Tjong S. Novel Electrospun Polylactic Acid Nanocomposite Fiber Mats with Hybrid Graphene Oxide and Nanohydroxyapatite Reinforcements Having Enhanced Biocompatibility. *Polymers (Basel)* 2016; 8: 287-296.
- [41] Tyagi B, Chudasama CD, Jasra RV. Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy. *Spectrochim Acta - A: Mol Biomol Spectrosc* 2012, 64(2): 273-278.
- [42] Ghosh SK, Das TK, Ganguly S, Nath K, Paul S, Ganguly D, Das NC. Silane functionalization of sodium montmorillonite and halloysite (HNT) nanoclays by ‘grafting to’ method to improve physico-mechanical and barrier properties of LLDPE/clay nanocomposites. *Polym Bull* 2023; 80(4): 4307-4335.
- [43] de Moraes Segundo JDP, de Moraes MOS, de Brito Soares AL, dos Santos GG, Silva RN, dos Santos Almeida R, Brito WR, d’Avila MA. Production and characterization of caffeic acid-loaded microfibrillar polycaprolactone mats obtained by electrospinning technology. *Int J Adv Eng Res Sci* 2021; 8(3): 17-25.
- [44] Zheng Y, Zaoui A. Wetting and nanodroplet contact angle of the clay 2:1 surface: The case of Na-montmorillonite (001). *Appl Surf Sci* 2017; 396: 717-722.

## Türkiye'nin Enerji Talebi Tahmin Probleminin Çözümünde Regresyon Yöntemlerine Dayalı Yaklaşımlar

Seyit Alperen ÇELTEK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman,  
Türkiye.

\*<sup>1</sup> salperencelteck@kmu.edu.tr

(Geliş/Received: 24/01/2024;

Kabul/Accepted: 13/05/2024)

**Öz:** Günümüzde enerji talebi ve bu talebin gelecekteki tahmini, sürdürülebilir enerji politikaları oluşturmak ve enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak için hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışmada Türkiye'nin 1979-2020 yılları arasında gözlemlenen enerji talebi, nüfus, gayri safi yurt içi hasıla, ihracat ve ithalat verileri kullanılarak enerji talep tahmin modelleri oluşturulmuştur. Enerji talep tahmini modellerini oluşturmak için çoklu regresyon ve polinom regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, literatürde bulunan yöntemlere kıyasla doğruluk oranı daha fazla olan bir talep tahmin modeli sunmaktır. Çalışmanın başlıca bulguları, çoklu regresyonun enerji talep tahmininde literatürdeki çalışmaların sonucu yakaladığını ve etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Ayrıca, polinom regresyon tabanlı yaklaşımla literatürdeki sonuçlar yaklaşık %4 oranında iyileştirilmiş ve güvenli bir tahmin modeli literatüre sunulmuştur. Ayrıca, elde edilen tahmin modeli kullanılarak Türkiye'nin 2021-2050 arasındaki enerji talebi tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirtilen dönemde enerji talebinin önemli ölçüde artacağını ortaya koymaktadır. 2021-2050 yılları arası enerji talebi artış oranının, geçmiş yıllara benzerlik göstermesi, regresyon tabanlı yöntemin güvenilirliğini desteklemektedir. Bu çalışma, enerji planlaması ve politika oluşturmadaki karar alıcılar için önemli bir referans kaynağı olabilir.

**Anahtar kelimeler:** Enerji talep tahmini, regresyon yöntemleri, polinom regresyon.

## Approaches Based on Regression Methods in Solving Turkey's Energy Demand Forecasting Problem

**Abstract:** Today's energy demand and the future prediction of this demand are of vital importance to create sustainable energy policies and ensure the effective use of energy resources. In this study, energy demand forecast models were created using Turkey's observed energy demand, population, gross domestic product, export and import data between 1979 and 2020. Multiple regression and polynomial regression methods were used to create energy demand forecast models. The main goal of the study is to present a demand forecasting model with a higher accuracy rate compared to the methods found in the literature. The main findings of the study show that multiple regression captures the results of studies in the literature and is an effective tool in energy demand forecasting. In addition, with the polynomial regression-based approach, the results in the literature were improved by approximately 4% and a reliable prediction model was presented to the literature. Additionally, Turkey's energy demand between 2021-2050 was estimated using the resulting forecast model. The results obtained reveal that energy demand will increase significantly in the specified period. The fact that the energy demand increase rate between 2021 and 2050 is similar to previous years supports the reliability of the regression-based method. This study can be an important reference source for decision makers in energy planning and policy making.

**Key words:** Energy demand forecasting, regression methods, polynomial regression.

### 1. Giriş

Enerji, modern yaşam standardının temelini oluşturur, toplumların gelişebilmesi için vazgeçilmez bir unsurdur. Bir ülkenin kalkınmasında ve dolayısı ile toplumsal refah seviyesinin yükseltilmesinde kritik bir role sahiptir [1]. Enerji, birçok yönüyle yaşamımızı etkiler ve gelişen toplumlarda daha iyi bir yaşam standardı sağlamak için kilit bir rol oynar. Günümüzde enerji kaynağına sahip olmanın ve enerjiyi kontrol etmenin, siyasi, ekonomik ve askeri anlamda önemi büyüktür [2]. Son yıllarda Rusya, Suriye, Irak gibi enerji kaynaklarına sahip olan ülkelerin kaos durumunda olması, pandemide yaşanan ekonomik durgunluktan sonra dünya ekonomisinin gelişmesi ve modernleşmenin ilerlemesi ile birlikte küresel enerji arzı ve enerji talebi arasında bir dengesizlik ortaya çıkmıştır [3-4]. Enerji kaynaklarının bulunduğu bölgelerdeki kaotik durumlar, küresel enerji arzına büyük zorluklar getirmektedir. Bu durum, enerji arzındaki istikrarsızlık ve güvenlik endişeleriyle sonuçlanabilir. Aynı zamanda, hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve sosyo-ekonomik gelişme, enerji talebinin artmasına neden olarak enerji birim fiyatlarını yükseltmektedir [5]. Dünya genelindeki enerji tüketimi, özellikle fosil yakıtların kullanımı, çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik endişeleri gibi faktörler, enerji maliyetinin şekillenmesinde önemli bir rol

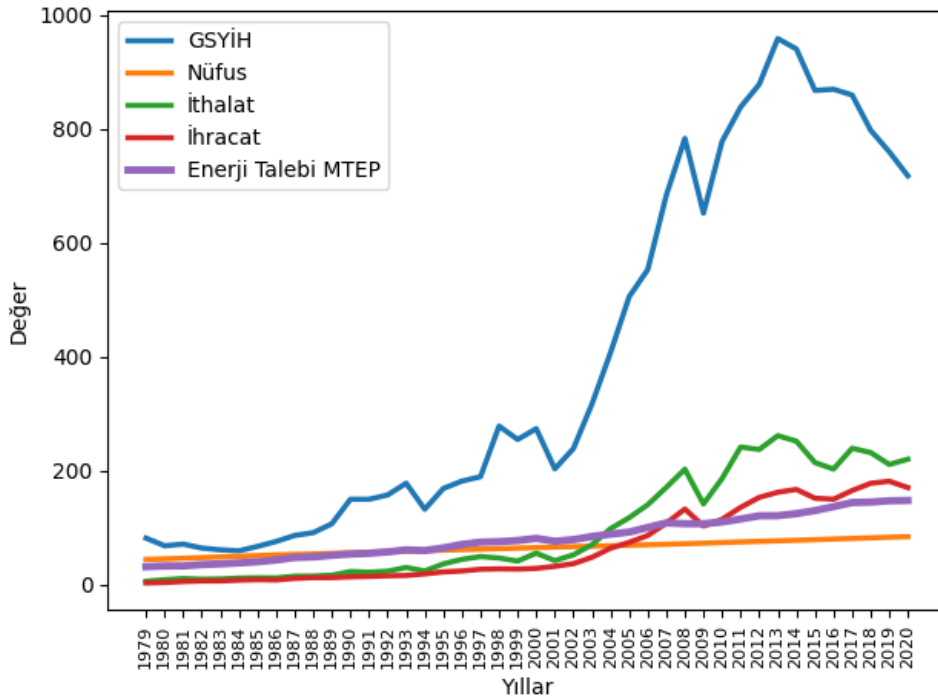
\* Sorumlu yazar: [salperencelteck@kmu.edu.tr](mailto:salperencelteck@kmu.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7097-2521>

oynamaktadır [6]. Enerji birim maliyetinin değişkenlik göstermesi, küresel enerji piyasasının dengesini etkilemektedir. Enerji maliyetlerindeki istikrarsızlık, işletmelerin enerji giderlerinin önceden tahmin edilmesini zorlaştırır. Enerji şirketleri, dalgalanan maliyetler nedeniyle gelecekteki projelerin finansmanını ve karlılığını öngörmekte zorlanır, enerji sektöründeki yatırımlar aksayabilir. İşletmeler ve endüstriler, istikrarsız enerji birim maliyetleri nedeniyle rekabet güçlerini kaybedebilirler [7].

Enerji fiyatlandırmasındaki istenmeyen dalgalanmanın önüne geçmenin yollarından biri de enerji planlamasıdır. Enerji planlaması, bir bölgenin enerji ihtiyaçlarını belirleme, enerji kaynaklarını yönetme ve sürdürülebilir enerji politikalarını geliştirme sürecidir. İstikrarlı bir enerji sektörü oluşturmak için üretilen enerji ile tüketilen enerjinin dengede kalmasını sağlamak [8], enerji talebi, enerji arzı, enerji iletimi, enerji dağıtımı ve enerji fiyatlandırmasına yönelik planlama yapmak gereklidir [9].

Enerji planlaması, ülkelerin gelecekteki enerji talebi artışını dikkate alarak yatırım planları yapmalarını ve bu doğrultuda bütçelerini ayarlamalarını gerektirir [10]. Enerji planlamasının önemli bileşenlerinden biri de enerji talep tahminidir. Enerji talep tahmini, belirli bir zaman aralığında bir bölge veya ülkedeki enerji tüketimini öngörme sürecini ifade etmektedir. Enerji talep tahmini, enerji planlaması, kaynak yönetimi, altyapı geliştirme ve talep karşılamak için gerekli önlemleri almak gibi stratejik kararlar için önemli bir temel oluşturur. Enerji talep tahmini, bir ülkeyi yönetenler için önemli politika araçlarından biridir [11]. Güvenilir enerji talep tahmini, enerji arzının planlanmasını ve talebi karşılamak için gerekli kaynakların tahsis edilmesini kolaylaştırır.

Literatür gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH), nüfus, ihracat ve ithalat gibi makro ekonomik faktörlerin enerji talebini etkilediğini vurgulamaktadır [12-15]. Asya ülkelerinde yapılan bir çalışma ile GSYİH ile enerji talebi arasında pozitif korelasyon olduğu, ekonomik büyüme ile enerji kullanımı arasındaki sıkı bir bağ olduğu iddia edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya göre ile ülkelerin GSYİH'sindeki artış, endüstriyel üretimi ve hane halkı gelirini yükselterek enerji talebini artırmaktadır [16]. Yapılan başka bir çalışma ile nüfus artışının enerji talebinde bir artışa yol açacağı, enerji altyapısının genişletilmesi gerektiği ve artan enerji taleplerini karşılamak üzere yeni enerji üretim stratejilerine ihtiyaç duyacağı vurgulanmıştır [17]. Enerji talebini etkileyen diğer önemli kritik faktör ise dış ticaret dengesidir. İhracat ve ithalatın enerji talebini etkilediği birçok çalışmada raporlanmıştır [18-21]. Şekil 1'de ülkemizin enerji talebi ve nüfus, ithalat, ihracat ve GSYİH gibi makroekonomik parametrelerin yıllar içindeki artışı görsel olarak gösterilmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 1979-2020).



Şekil 1. 1979-2020 yılları arasındaki ekonomik parametreler ve enerji ihtiyacındaki artış.

Literatürde enerji talep belirleme konusunda Şekil 1'de verilen makroekonomik verilerin kullanımına sıkça başvurulmuş ve enerji talep problemini çözmek için literatürde birçok farklı yöntem önerilmiştir. Yapılan bir çalışma da Türkiye'nin enerji talebi tahmini ağaç tohumu algoritması ve modifiye ağaç tohumu algoritması

kullanılarak lineer formda belirlenmeye çalışılmıştır [22]. Başka bir çalışma da ise Türkiye'nin enerji tüketimini tahmin etmek için modifiye edilmiş yapay arı kolonisi algoritması tabanlı bir teknik uygulanmıştır. Modifiye edilmiş yapay arı kolonisi algoritması ile enerji talebinin gerçekçi değerlere yakın ve doğru tahmin edilerek ülkelerin geleceğine yönelik planlama ve önceliklerin belirlenmesine katkı sağlaması konusunda potansiyeli vurgulanmıştır [23]. Türkiye'nin ulaşım alanındaki enerji talebi ise modifiye edilmiş yapay arı kolonisi kullanılarak başarılı bir şekilde tespit edilmiştir [24]. Başka bir çalışmada ise Türkiye'nin doğalgaz enerji ihtiyacına yönelik bir çalışma yapılmış ve bu ihtiyaç meta sezgisel algoritmalar ile tespit edilmeye çalışılmıştır [25].

Özetlemek gerekirse, günümüzde enerji talep tahmini, sürdürülebilir enerji yönetimi ve kaynak planlaması için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu çalışma, regresyon tabanlı yaklaşım kullanılarak enerji talep tahmini problemini ele almaktadır. Gelişmiş istatistiksel bir teknik olan regresyon, değişkenler arasındaki ilişkiyi anlamak ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılan bir matematiksel modelleme yöntemidir [26-27]. Bu çalışma, enerji sektöründe daha doğru tahminler elde etmek için regresyonun potansiyelini ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Böylece enerji yönetimi uygulamalarında daha etkili kararlar alınabilir ve enerji kaynakları daha verimli bir şekilde kullanılabilir.

Bu çalışmada Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 1979–2020 yılları arasına ait gözlemlenen enerji talebi, nüfus, gayri safi yurt içi hasıla, ihracat ve ithalat verileri kullanılarak enerji talep tahmin modeli oluşturulmuştur. Regresyon kullanılarak oluşturulan tahmin modelleri, literatürde sık kullanılan yöntemler ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca 2024-2030 yılları arasındaki enerji talebine yönelik projeksiyonlar yapılmıştır ve elde edilen sonuçların hepsi literatürle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın ana hatları şu şekildedir; Bölüm 2'de bu çalışmada kullanılan regresyon yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 3'te, enerji talep tahmin problemi matematiksel olarak açıklanmıştır. Önerilen regresyon modelinin performansını değerlendirmek için izlenen deneysel çerçeve Bölüm 4'te verilmektedir. Bu çalışma, Bölüm 5'te tartışma ve geleceğe yönelik öneriler ile sonlandırılmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bir veya daha fazla bağımsız değişkenin, bir bağımlı değişken üzerindeki etkisini inceleyen istatistiksel bir yöntemdir [28]. Değişkenler arasındaki ilişkiyi modellemek ve gelecekteki değerleri tahmin etmek amacıyla kullanılır [29]. Temelde, regresyon analizi, veriler arasındaki örüntüyü anlamak ve bu örüntüyü kullanarak bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için matematiksel bir model oluşturur. Lineer regresyon durumu Denklem 1'deki gibi ifade edilebilir.

$$Y = a_0 + a_1X \quad (1)$$

Denklem 1'de,  $Y$ : bağımlı değişkeni,  $X$ : bağımsız değişkeni,  $a_0$ : doğrunun y-eksenini kestiği kesişim noktasını,  $a_1$  ise bağımsız değişkenin katsayısını yani doğrunun eğimini temsil etmektedir. Birden fazla bağımsız değişken olduğunda, çoklu doğrusal regresyon durumunda, Denklem 2'deki gibi genişletilebilir.

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (2)$$

Denklem 2, regresyon analizinde kullanılan matematiksel temsilin genel formülünü sağlar. Burada  $n$ : bağımsız değişken sayısını,  $X_n$ :  $n$ . bağımsız değişkeni,  $a_n$ :  $n$ . bağımsız değişkenin katsayısını ifade etmektedir. Değişkenler arası örüntünün doğrusal olmadığı durumları ifade edebilmek için bağımsız değişkenlerin üst dereceli terimleri de kullanılarak polinom regresyon yöntemi oluşturulur. İkinci dereceden bir polinom regresyonu örneği Denklem 3'te verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2 \quad (3)$$

Regresyon analizi, bilim, mühendislik, ekonomi ve sosyal bilimler gibi birçok disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır [30-32]. Regresyon analizi hakkında daha detaylı bilgi için [33, 34] yayına göz atılabilir.

### 3. Enerji Talep Tahmin Problemi

Bu bölümde bu çalışmanın odak noktası olan enerji talep tahmin problemi açıklanmıştır. Türkiye'nin sosyal ve ekonomik büyümesinin bir yansıması olarak enerji talebinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, enerji planlaması ve kaynak yönetimi açısından kritiktir.

Bu çalışma, Türkiye'nin uzun vadeli enerji talebini öngörmek için regresyon tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Bu çalışmada, lineer ve kuadratik olmak üzere iki farklı matematiksel model kullanarak enerji talep tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin girdi verileri olarak, bir ülkenin enerji ihtiyacının belirlenmesinde sıkça kullanılan nüfus, GSYİH, ihracat ve ithalat parametreleri kullanılmıştır.

Adil bir karşılaştırma yapmak için bu çalışma da literatürde verilen ekonomik veriler kullanılmıştır [35]. Kullanılan parametre değerlerine Tablo 1'de yer verilmiştir. Tablo 1, Belirtilen yıllar içerisinde GSYİH, nüfus, ithalat, ihracat ve enerji ihtiyaç değerini göstermektedir. 1979-2020 yılları arasındaki verilere göre uygulama yapılmıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak, regresyon yöntemleri Tablo 1'de verilen veriler arasındaki ilişkiyi inceleyerek, kullanılan makroekonomik parametrelerin enerji talep tahminine etkisini bir lineer bir denklem şeklinde ifade etmek için çalıştırılmıştır. Dört değişkenli lineer fonksiyonun matematiksel formunu, Denklem 4'teki gibi ifade etmek mümkündür;

$$E_l = a_1 + a_2X_1 + a_3X_2 + a_4X_3 + a_5X_4 \quad (4)$$

Ancak, verilerin lineer olmayan bir ilişki içermesi durumunda, Denklem 4'te verilen lineer fonksiyon veri setini temsil etme konusunda yetersiz kalmaktadır ve daha karmaşık matematiksel teknikler kullanılması gerekmektedir. İkinci dereceden denklem için ise, aynı parametrelerle enerji talebi arasındaki ilişkiyi daha karmaşık bir şekilde modellemek amacıyla kuadratik denklem kullanılmıştır. Dört değişken için kuadratik form denklemi ise Denklem 5 şeklinde ifade edilebilir.

$$E_{id} = a_1 + a_2X_1 + a_3X_2 + a_4X_3 + a_5X_4 + a_6X_1X_2 + a_7X_1X_3 + a_8X_1X_4 + a_9X_2X_3 + a_{10}X_2X_4 + a_{11}X_3X_4 + a_{12}x_1^2 + a_{13}x_2^2 + a_{14}x_3^2 + a_{15}x_4^2 E_{id} \quad (5)$$

Denklem 4 ve Denklem 5'teki  $X_{1,2,3,4}$  değerleri sırasıyla GSYİH, nüfus, ithalat, ihracat değerlerini temsil etmektedir. Bu iki denklem ile Türkiye'nin enerji talebinin ekonomik parametreler ile ilişkisinin matematiksel olarak ifade edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Denklem 4 ve Denklem 5'teki ağırlıklar ( $a_{1,2,\dots,15}$ ) için uygun değerlerin bulunması gerekmektedir. Denklem 4 ve Denklem 5'te verilen  $a_1$  değişkeni bağımsız değişken diğer tüm değişkenler ise ( $a_{2,3,\dots,15}$ ) bağımlı değişken olup, yanında bulunduğu verinin ağırlığını temsil etmektedir.

Denklem 4 ve 5'teki katsayıları belirlemek için, Denklem 6'da tanımlanan *Fark* fonksiyonu kullanılmıştır. *Fark* fonksiyonu enerji talebinin gerçek değerleri ile hesaplanan enerji talebi değerleri arasındaki farkın karesinin toplamını hesaplar. *Fark* fonksiyonu, gerçek değerler ile hesaplanan değerler arasındaki farkı minimize etmek için kullanılmaktadır.

$$Fark = \sum_{y=1}^Y (Enerji Talebi_y - Hesaplanan Enerji Talebi_y)^2 \quad (6)$$

Denklem 6'da  $Y$ , verisi alınan yılları sembolize etmek için kullanılır. *Enerji Talebi<sub>y</sub>*, Tablo 1'de verilen  $y$ . yıldaki Enerji Talep değerini, *Hesaplanan Enerji Talebi<sub>y</sub>* ise Denklem 4 ve Denklem 5 ile elde edilen denklemlerin sonucunu temsil etmektedir.

**Tablo 1.** 1979-2020 yılları arasındaki makro-ekonomik parametreler ve enerji ihtiyacı verileri.

Yıl	GSYİH \$ 10 <sup>9</sup>	Nüfus 10 <sup>6</sup>	İthalat \$ 10 <sup>9</sup>	İhracat \$ 10 <sup>9</sup>	Enerji Talebi MTEP
1979	80,97	43,53	5,07	2,26	30,71
1980	67,46	44,44	7,91	2,91	31,97
1981	70,40	45,54	9,93	4,70	32,05
1982	63,50	46,69	8,84	5,75	34,39
1983	60,36	47,86	9,24	5,73	35,70
1984	58,64	49,07	10,76	7,12	37,43
1985	66,41	50,31	11,34	7,95	39,40
1986	75,04	51,48	11,10	7,46	42,47
1987	85,62	52,37	14,16	10,19	46,88
1988	90,51	53,27	14,34	11,66	47,91
1989	106,11	54,19	15,79	11,62	50,71
1990	149,19	55,12	22,30	12,96	52,98
1991	149,16	56,06	21,05	13,59	54,27
1992	156,66	56,99	22,87	14,72	56,68
1993	177,33	57,91	29,43	15,35	60,26
1994	131,64	58,84	23,27	18,11	59,12
1995	168,08	59,76	35,71	21,64	63,68
1996	181,08	60,67	43,63	23,22	69,86
1997	188,73	61,58	48,56	26,26	73,78
1998	277,67	62,46	45,92	26,97	74,71
1999	254,12	63,36	40,67	26,59	76,77
2000	273,09	64,27	54,50	27,78	80,50
2001	202,50	65,17	41,40	31,33	75,40
2002	238,15	66,00	51,55	36,06	78,33
2003	316,56	66,80	69,34	47,25	83,84
2004	407,02	67,60	97,54	63,17	87,82
2005	504,75	68,44	116,77	73,48	91,58
2006	552,37	69,30	139,58	85,54	99,59
2007	683,02	70,16	170,06	107,27	107,63
2008	782,86	71,05	201,96	132,03	106,27
2009	651,54	72,04	140,93	102,14	106,14
2010	777,46	73,14	185,54	113,88	109,27
2011	837,92	74,22	240,84	134,91	114,48
2012	877,68	75,18	236,55	152,46	120,09
2013	958,13	76,15	260,82	161,48	120,29
2014	939,92	77,18	251,14	166,51	123,94
2015	867,07	78,22	213,62	150,98	129,30
2016	869,24	79,28	202,19	149,25	136,20
2017	859,06	80,31	238,72	164,50	143,40
2018	797,12	81,41	231,15	177,17	144,20
2019	759,29	82,58	210,35	180,83	146,50
2020	717,09	83,39	219,52	169,64	147,11



## 4. Simülasyon ve Sonuçlar

### 4.1. Optimizasyon Prosedürü

Bu çalışmada kullanılan regresyon yöntemi tabanlı yazılım, Python dilinde yazılmıştır. Yapılan yazılım JetBrains şirketi tarafından geliştirilen bir Python IDE (Integrated Development Environment) olan PyCharm'de çalıştırılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan bütün simülasyonlar, Windows 10 işlemci, I7 7500U Intel 2.7 GHz işlemci ve 16 GB RAM kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1. Regresyon Tabanlı ile Enerji Talep Tahmini Optimizasyonu

Bu çalışmada ilk olarak Denklem 4'te verilen lineer denklemi çözmek için çoklu regresyon, Denklem 5'te verilen ikinci dereceden denklemi çözmek için polinom regresyon yöntemi kullanılmıştır. Önerilen regresyon tabanlı yöntem, Denklem 4'te verilen parametrelerin ağırlıklarının tahmin etmek için çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alınarak oluşturulan eşitlik Denklem 7'deki gibidir;

$$E_t = -69,5712 + 0,0029 X_1 + 2,1908 X_2 + (-0,0790) X_3 + 0,2802 X_4 \quad (7)$$

Bu çalışmada önerilen regresyon tabanlı yönteminin performansını değerlendirmek için literatürde kullanılan Arşimet optimizasyon algoritması (AOA) ve Geliştirilmiş Arşimet optimizasyon algoritması (IAOA) ile karşılaştırma yapılmıştır [35] (Tablo 2). Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA), Arşimet prensibine dayanan ve doğal olaylardan ilham alan bir optimizasyon algoritmasıdır [36, 37]. Arşimet prensibi, bir nesnenin sıvı içinde yüzerken aldığı kaldırma kuvvetinin, nesnenin sıvı içinde itildiği kuvvetle eşit olduğunu belirtir. AOA'nın çalışma prensibi, bir problemi çözmek için potansiyel aday çözümleri oluşturmak ve bu çözümleri optimize etmek için bir dizi iterasyonel adımdan oluşur. Her iterasyonda, aday çözümler, bir merkez etrafında rastgele dağılmış olan kapalı bir bölgede yer alır. Bu bölge, çözüm alanının arama alanını temsil eder. AOA, her aday çözümün değerini hesaplar, ardından daha iyi çözümler elde etmek için bu adayları günceller [37]. Geliştirilmiş Arşimet Optimizasyon Algoritması (IAOA), Arşimet Optimizasyon Algoritmasının (AOA) performansını artırmak için önerilmiş bir gelişmiş versiyondur. IAOA, AOA'nın temel prensiplerine dayanırken, çeşitli geliştirmeler ve iyileştirmeler içerir [35].

Karşılaştırma için kullanılan algoritmaların tercih edilme sebepleri ise literatürde güncel verilerle (1979-2020) enerji talep tahmini problemini ele alan tek çalışma olmalarıdır [35].

**Tablo 2.** Çoklu Regresyon yönteminin katsayı sonuçları ve hata metriği karşılaştırması.

	<i>AOA</i>	<i>IAOA</i>	<i>Lineer Regresyon</i>
<i>Fark</i>	345,69	345,69	345,84
<i>Toplam Hata</i>	99,77	99,77	99,84
<i>a<sub>1</sub></i>	69,6122	69,6122	-69,5712
<i>a<sub>2</sub></i>	0,0030	0,0030	0,0029
<i>a<sub>3</sub></i>	2,1915	2,1915	2,1908
<i>a<sub>4</sub></i>	-0,794	-0,794	-0,0790
<i>a<sub>5</sub></i>	0,2804	0,2804	0,2802

Tablo 2'deki *a<sub>1</sub>*, *a<sub>2</sub>*, *a<sub>3</sub>*, *a<sub>4</sub>* ve *a<sub>5</sub>* parametreleri Denklem 7'deki katsayıları temsil etmektedir. Denklem 6'da verilen *Fark* ise algoritmalar tarafından hesaplanan değerle, gerçek verinin farkını sembolize etmektedir. Tablo 2'de verilen lineer denklem fark sonuçlarına bakıldığında AOA ve IAOA algoritmalarının 0,15 gibi küçük bir değerle (%0,0434 tekabül etmektedir) daha iyi bir sonuç verdiği görülmektedir. Toplam hata, tahminlerin gerçek değerlere olan toplam farkını ifade etmektedir. Toplam hata sonuçlarına bakıldığında ise yine %0,1'lik bir fark göze çarpmaktadır.

Literatüre bakıldığında enerji tahmin problemi sadece lineer olarak değil ayrıca ikinci dereceden denklem kullanılarak temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada polinom regresyon kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alınarak oluşturulan eşitlik Denklem 8'deki gibidir;

$$E_{id} = -32,9916 + (0,1527)X_1 + (0,9166)X_2 + (-0,8659)X_3 + (0,3824)X_4 + (0,00009)X_1X_2 + (-0,0020)X_1X_3 + (-0,0019)X_1X_4 + (0,0025)X_2X_3 + (0,0097)X_2X_4 + (0,0244)X_3X_4 + (-0,0198)x_1^2 + (0,0032)x_2^2 + (-0,0060)x_3^2 + (0,0018 - 03)x_4^2 \quad (8)$$

**Tablo 3.** Polinom regresyon yöntemin katsayı sonuçları ve hata metriği karşılaştırması.

	<i>AOA</i>	<i>IAOA</i>	<i>Polinom Regresyon</i>
<i>Fark</i>	118,83	115,78	109,52
<i>Toplam Hata</i>	50,45	50,26	49,51
<i>a<sub>1</sub></i>	-2,2577	-7,4041	-32,9916
<i>a<sub>2</sub></i>	0,0919	0,0038	0,1527
<i>a<sub>3</sub></i>	-0,2271	-0,0496	0,9166
<i>a<sub>4</sub></i>	0,1688	0,3541	-0,8659
<i>a<sub>5</sub></i>	-0,6658	-0,6000	0,3824
<i>a<sub>6</sub></i>	-0,0006	0,0005	0,00009
<i>a<sub>7</sub></i>	-0,0004	-0,0010	-0,0020
<i>a<sub>8</sub></i>	0,0019	0,0017	-0,0019
<i>a<sub>9</sub></i>	0,0051	0,0033	0,0025
<i>a<sub>10</sub></i>	-0,0014	-0,0029	0,0097
<i>a<sub>11</sub></i>	-0,0004	-0,0009	0,0244
<i>a<sub>12</sub></i>	-0,0001	-0,0000	-0,0198
<i>a<sub>13</sub></i>	-0,0204	0,0172	0,0032
<i>a<sub>14</sub></i>	-0,0004	0,0008	-0,0060
<i>a<sub>15</sub></i>	-0,0017	-0,0007	0,0018

Tablo 3, polinom regresyon sonuçlarına ve literatür karşılaştırmasına yer vermiştir. Karşılaştırma yapmak için kullanılan sezgisel tabanlı AOA ve IAOA algoritmaları problemleri çözmek için evrimsel hesaplama yöntemleri ile çözüm alanını tarayıp optimum çözümü bulmayı hedefler. Sezgisel yöntemler bazı durumlarda karmaşık problemler için uygun sonuçlar üretmekte sınırlı olabilirler. Çünkü sezgisel yöntemler kesin sonuçlar vaat etmezler ve kesin sonuçlar yerine yaklaşık çözümler sunarlar [38, 39]. Ancak regresyon modelleri, belirli bir bağımlı değişkenin bir veya daha fazla bağımsız değişkenle olan ilişkisini doğrudan modelleyerek sonuçlar elde eder. Regresyon modellerinin çalışma yapısı, ekonomik ve demografik değişkenler gibi karmaşık ilişkileri içeren enerji talep tahmini gibi durumlarda her bir değişkenin sonuca etkisini belirleme ve optimum katsayı çıkarımı yapmak için daha uygundur. Elde edilen sonuç, polinom regresyonun veri setindeki ilişkileri daha iyi yakalayabildiği ve daha doğru tahminlerde bulunduğu anlamına gelmektedir. Sonuçlara göre polinom regresyonun, IAOA ve AOA algoritmalarına kıyasla % 4'lük bir iyileşme sağlaması ve toplam hata sonuçlarındaki %2'lik iyileşme de bu çıkarımı desteklemektedir.

Çoklu regresyon modeli, bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi analiz ederken, polinom regresyon modeli, bağımsız değişkenler arasındaki daha karmaşık, ikinci dereceden bir ilişkiyi dikkate alır. Bu nedenle, polinom regresyon modeli, veri setindeki karmaşıklığı daha iyi yakalayabilir ve daha esnek bir şekilde uyum sağlayabilir. Bu çalışmada da polinom regresyon modeli çoklu regresyon modeline göre daha iyi performans göstermiştir. Çalışma sonuçları enerji talep veri setindeki ilişkilerin doğrusal olmadığını ve polinom regresyon modelinin bu karmaşıklığı daha iyi açıkladığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, polinom regresyonunun literatürdeki 1979-2020 yılları arasındaki verileri kullanarak tahmin yapan benzer çalışmalara kıyasla daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu, polinom regresyonunun 1979-2020 yılları arasındaki makroekonomik veri seti için en uygun model olduğunu ve diğer yöntemlere göre daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısı ile polinom regresyonun sonuçları göz önüne alınarak ülkemizin önümüzdeki yıllar için (2024-2050) enerji tüketimi hesabı yapılmıştır. Literatürde enerji tüketimi için tanımlanan senaryolardan biri kullanılmıştır [35]. Kullanılan senaryoya ait bilgilere Tablo 4'te yer verilmiştir. Tablo 5'te ise 2021-2050 arası polinom regresyon sonuçları verilmiştir.

**Tablo 4.** Türkiye'nin 2021-2050 yılları arası makroekonomik verilerdeki değişimi.

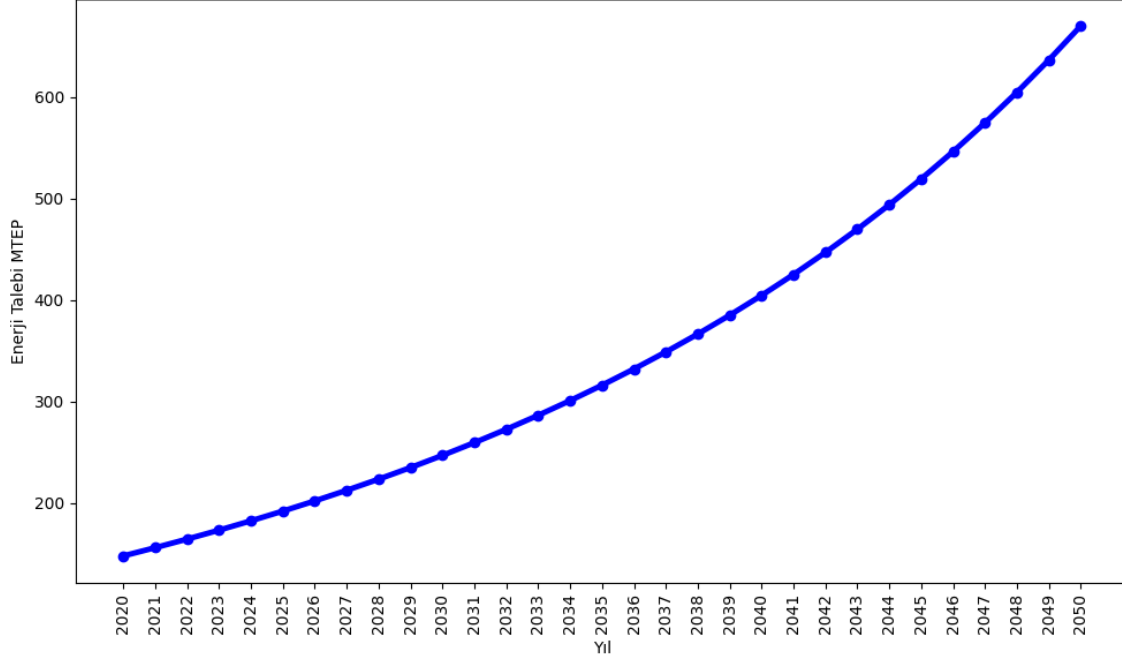
	<i>GSYİH Artış Oranı</i>	<i>İhracat Artış Oranı</i>	<i>Nüfus Artış Oranı</i>	<i>İthalat Artış Oranı</i>
<i>Senaryo 1</i>	% 4	% 3	%0,5	%2,5

**Tablo 5.** Türkiye'nin 2021-2050 yıllarına yönelik enerji talep tahmin sonuçları.

Yıl	GSYİH \$ 10 <sup>9</sup>	Nüfus 10 <sup>6</sup>	İthalat \$ 10 <sup>9</sup>	İhracat \$ 10 <sup>9</sup>	Tahmini Enerji Talebi MTEP
2020	717,09	83,39	219,52	169,64	147,7291
2021	745,7736	85,8917	220,6176	173,881	155,8382
2022	775,6045	88,46845	221,7207	178,228	164,2882
2023	806,6287	91,1225	222,8293	182,6837	173,0982
2024	838,8939	93,85618	223,9434	187,2508	182,2887
2025	872,4496	96,67187	225,0632	191,9321	191,8814
2026	907,3476	99,57202	226,1885	196,7304	201,8995
2027	943,6415	102,5592	227,3194	201,6487	212,3679
2028	981,3872	105,636	228,456	206,6899	223,3132
2029	1020,643	108,805	229,5983	211,8571	234,7633
2030	1061,468	112,0692	230,7463	217,1535	246,7490
2031	1103,927	115,4313	231,9	222,5824	259,3024
2032	1148,084	118,8942	233,0595	228,1469	272,4578
2033	1194,008	122,461	234,2248	233,8506	286,2524
2034	1241,768	126,1349	235,3959	239,6969	300,7258
2035	1291,439	129,9189	236,5729	245,6893	315,9196
2036	1343,096	133,8165	237,7558	251,8315	331,8793
2037	1396,82	137,831	238,9446	258,1273	348,6530
2038	1452,693	141,9659	240,1393	264,5805	366,2921
2039	1510,8	146,2249	241,34	271,195	384,8517
2040	1571,232	150,6116	242,5467	277,9749	404,3907
2041	1634,082	155,13	243,7594	284,9243	424,9722
2042	1699,445	159,7839	244,9782	292,0474	446,6631
2043	1767,423	164,5774	246,2031	299,3486	469,5357
2044	1838,12	169,5147	247,4341	306,8323	493,6667
2045	1911,645	174,6001	248,6713	314,5031	519,1386
2046	1988,11	179,8381	249,9146	322,3657	546,0390
2047	2067,635	185,2333	251,1642	330,4248	574,4624
2048	2150,34	190,7903	252,42	338,6854	604,5090
2049	2236,354	196,514	253,6821	347,1526	636,2867
2050	2325,808	202,4094	254,9505	355,8314	669,9100

Tablo 5'teki Tahmini Enerji Talebi hariç tüm parametreler, Tablo 4'te verilen senaryodaki artışa göre hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere Denklem 4.2'de yerine konularak Tahmini Enerji Talebi hesaplanmıştır.

Şekil 2’de 2020-2050 yılları için polinom regresyon kullanılarak elde edilen enerji talep tahmini (MTEP) görsel olarak verilmiştir. Şekil 2’de gösterilen sonuca göre, otuz sene içinde enerji talebinde yaklaşık 5 kat artış gözlemlenmektedir. 1979-2020 yılları arasındaki artışın da hemen hemen benzer oranda olması elde edilen sonucu desteklemektedir. Elde edilen sonuçlar, enerji talebinde önemli bir artışın beklendiğini göstermektedir, ancak bu tahminlerin senaryo 1 sınırlamaları kapsamında elde edildiği unutulmamalıdır.



Şekil 2. 2020-2050 yılları için polinom regresyon kullanılarak elde edilen enerji talep tahmini (MTEP).

## 5. Tartışma ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, makroekonomik veriler ışığında enerji talep tahmini probleminin odaklanarak, regresyon tabanlı yöntemler uygulayarak çözümler aramıştır. Literatürdeki birçok çalışmanın aksine, literatürde bulunan en güncel verilerle (1979-2020) uygulama yapılmıştır. Çoklu regresyon ve polinom regresyon yöntemleri kullanılarak doğrusal ve ikinci dereceden denklemlerin katsayıları tespit edilmiştir. Çoklu regresyon yöntemi ile literatürdeki sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Polinom regresyon yöntemi ile literatürdeki sonuçlar yaklaşık % 4 oranında iyileştirilmiş ve Türkiye'nin enerji tahmin talep problemi çözümüne doğruluk oranı daha fazla olan bir çözüm sunulmuştur.

Regresyon tabanlı modeller, doğrudan veriye dayalı matematiksel ilişkileri modellediği için, karmaşık ilişkileri daha doğru bir şekilde yakalayabilir ve tahminlerde daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Regresyon analizi, belirli ekonomik, demografik ve enerji politikası değişkenlerinin enerji talebi üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirebilmektedir. Literatürdeki en güncel yöntemler olan AOA ve IAOA sonuçlarının % 4 oranında geliştirilmesi bu çıkarıma kanıt olarak verilebilir.

Bu çalışma da ayrıca polinom regresyon yöntemi ile elde edilen katsayılar kullanılarak ülkemizin 2021-2050 arası enerji talebi tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirtilen yıllar arasında enerji talebinin ciddi oranda artış göstereceğini ortaya koymaktadır. 2021-2050 yılları arası enerji talebindeki artış oranının, 1979-2020 yılları arası enerji artış oranına benzerlik göstermesi regresyon tabanlı yöntemin enerji talep tahmini problemindeki başarısını destekler niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda, regresyon tabanlı yöntemlerin daha fazla iyileştirilmesi ve daha spesifik senaryolar altında kullanılabilirliğinin genişletilmesi için daha fazla çaba harcanacaktır. Ayrıca, regresyon analizinin, belirli sektörler veya coğrafi bölgeler üzerindeki etkilerini incelemek, daha spesifik tahminler elde etmek için değerli olabilir.

## Kaynaklar

- [1] Kahraman G. Türkiye'de kentleşmenin enerji tüketimi ve karbon salınımı üzerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology* 2019; 9(3): 1559-1566.
- [2] Nia AR, Awasthi A, Bhuiyan N. Industry 4.0 and demand forecasting of the energy supply chain: A literature review'. *Comput Ind Eng* 2021; 154: 107128.
- [3] Ozili PK, Ozen E. Global Energy Crisis: Impact on the Global Economy. In: Sood K, Grima S, Young P, Ozen E, Balusamy B, editors. *The Impact of Climate Change and Sustainability Standards on the Insurance Market*. 1st ed. Wiley; 2023. pp. 439-454.
- [4] Zakeri B, et al. Pandemic, war, and global energy transitions. *Energies* 2022; 15(17): 6114.
- [5] Peng B, Chang BH, Yang L, Zhu C. Exchange rate and energy demand in G7 countries: Fresh insights from Quantile ARDL model. *Energy Strategy Rev* 2022; 44: 100986.
- [6] Taghvaei VM, Nodehi M, Assari Arani A, Rishehri M, Nodehi SE, Shirazi JK. Fossil fuel price policy and sustainability: energy, environment, health and economy. *Int. J Energy Sect. Manag* 2023; 17(2): 371-409.
- [7] Astrov V, Hanzl-Weiss D, Leitner SM, Pindyuk O, Pöschl J, Stehrer R. Energy efficiency and EU industrial competitiveness: Energy costs and their impact on manufacturing activity. *The Vienna Institute for International Economic Studies Research Report*. Vienna, Austria; 2015.
- [8] Zhang J, Tan Z, Wei Y. An adaptive hybrid model for short term electricity price forecasting. *Appl Energy* 2020; 258: 114087.
- [9] Beskirlı M, Haklı H, Kodaz H. The energy demand estimation for Turkey using differential evolution algorithm. *Sādhanā*. 2017; 42(10): 1705-1715.
- [10] Rafique SF, Jianhua Z. Energy management system, generation and demand predictors: a review. *IET Gener Transm Distrib* 2018; 12(3): 519-530.
- [11] Toksarı MD. Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey. *Energy Policy* 2007; 35(8): 3984-3990.
- [12] Rao C, Zhang Y, Wen J, Xiao X, Goh M. Energy demand forecasting in China: A support vector regression-compositional data second exponential smoothing model. *Energy* 2023; 263: 125955.
- [13] Avtar R, Tripathi S, Aggarwal AK, Kumar P. Population-urbanization-energy nexus: a review. *Resources*. 2019; 8(3): 136.
- [14] Supersberger N, Führer L. Integration of renewable energies and nuclear power into North African Energy Systems: An analysis of energy import and export effects. *Energy Policy* 2011; 39(8): 4458-4465.
- [15] Stern DI. Energy-GDP relationship. *The New Palgrave Dictionary of Economics*; Palgrave Macmillan: London, UK; 2018.
- [16] Liu W-C. The relationship between primary energy consumption and real gross domestic product: Evidence from major Asian countries. *Sustainability* 2020; 12(6): 2568.
- [17] Sheffield J. World population and energy demand growth: the potential role of fusion energy in an efficient world. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser A* 1999; 357(1752): 377-395.
- [18] Dedeoğlu D, Kaya H. Energy use, exports, imports and GDP: New evidence from the OECD countries. *Energy Policy* 2013; 57: 469-476.
- [19] Carfora A, Pansini RV, Scandurra G. Energy dependence, renewable energy generation and import demand: Are EU countries resilient? *Renewable Energy*. 2022; 195: 1262-1274.
- [20] Shahzad U, Doğan B, Sinha A, Fareed Z. Does Export product diversification help to reduce energy demand: Exploring the contextual evidences from the newly industrialized countries. *Energy* 2021; 214: 118881.
- [21] Ahmad T, Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Rep* 2020; 6: 1973-1991.
- [22] Beşkirlı A, Temurtaş H, Özdemir D. Determination with Linear Form of Turkey's Energy Demand Forecasting by the Tree Seed Algorithm and the Modified Tree Seed Algorithm. *Advances in Electrical & Computer Engineering*, 2020; 20(2).
- [23] Özdemir D, Dörterler S, Aydın D. A new modified artificial bee colony algorithm for energy demand forecasting problem. *Neural Comput Appl* 2022; 34(20): 17455-17471.
- [24] Özdemir D, Dörterler S. An adaptive search equation-based artificial bee colony algorithm for transportation energy demand forecasting. *Turk J Electr Eng Comput Sci* 2022; 30(4): 1251-1268.
- [25] Bilici Z, Özdemir D, Temurtaş H. Comparative analysis of metaheuristic algorithms for natural gas demand forecasting based on meteorological indicators. *J Eng Res* 2023; 11(3): 259-265.
- [26] Chatterjee S, Hadi AS. *Regression analysis by example*. John Wiley & Sons, USA; 2013.
- [27] Draper NR, Smith H. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, USA; 1998.
- [28] Narin S, Doğan O, Bande N, Yunus G. Keçiören/Ankara Özelinde Konut Rayiç Değerlerinin Tahmininde Çoklu Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development* 2023; 15(2): 828-839.
- [29] Sajid T, Jamshed W, Ibrahim RW, Eid MR, Abd-Elmonem A, Arshad M. Quadratic regression analysis for nonlinear heat source/sink and mathematical Fourier heat law influences on Reiner-Philippoff hybrid nanofluid flow applying Galerkin finite element method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2023; 568: 170383.

- [30] Lin P, Hong Y, He Y, Pei M. Advancing and lagging effects of weather conditions on intercity traffic volume: A geographically weighted regression analysis in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *International Journal of Transportation Science and Technology* 2024; 13: 58-76.
- [31] Kim D-H, et al. Regression analysis of nasal shape from juvenile to adult ages for forensic facial reconstruction. *Legal Med* 2024; 66: 102363.
- [32] Vardopoulos I. Adaptive Reuse for Sustainable Development and Land Use: A Multivariate Linear Regression Analysis Estimating Key Determinants of Public Perceptions. *Heritage* 2023; 6(2): 809-828.
- [33] Arkes J. *Regression analysis: a practical introduction*. Taylor & Francis, England; 2019.
- [34] Sykes AO. *An introduction to regression analysis*. USA; 1993.
- [35] Aslan M. Archimedes optimization algorithm based approaches for solving energy demand estimation problem: a case study of Turkey. *Neural Comput Appl* 2023; 35(26): 19627-19649.
- [36] Toğaçar M. Arşimet Optimizasyon Algoritması ile Trafo Tabanlı Evrişimsel Sinir Ağı Modelini Kullanarak Yazılım Tanımlı Ağ Teknolojisi Verilerinde Saldırı Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2022; 34(1): 341-349.
- [37] Hashim FA, Hussain K, Houssein EH, Mabrouk MS, Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Appl Intell* 2021; 51(3): 1531-1551.
- [38] Pham D, Karaboga D. *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. Springer Science & Business Media, Germany; 2012.
- [39] Karaboğa D. *Yapay zeka optimizasyon algoritmaları*. Nobel Akademi Yayıncılık, Türkiye; 2014.



## Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)

Ramazan OĞUZ<sup>1\*</sup>, Recep ERYİĞİT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Adli Tıp ve Adli Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> ramazan.oguz@ogr.iuc.edu.tr, <sup>2</sup> reryigit@eng.ankara.edu.tr

(Geliş/Received: 01/02/2024;

Kabul/Accepted: 13/07/2024)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı, adli bilişim incelemelerinin giderek artan karmaşıklığına çözüm sunmak amacıyla “Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)” geliştirmeyi hedeflemektedir. Ulusal ve uluslararası düzeyde mevcut adli bilişim süreçlerinin karşılaştırmalı analizi yapılarak, hukuki gerekliliklere uygun, eksiksiz ve kapsamlı bir süreç tasarlanmıştır. YABİS, hazırlık ve delillerin iadesi gibi genellikle göz ardı edilen kritik aşamaları içerecek şekilde kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu süreç, adli bilişim incelemelerinin etkinliğini artırma, delillerin bütünlüğünü koruma ve dijital kanıtların adli süreçlerde daha güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlama potansiyeline sahiptir. Araştırma, adli bilişim uzmanları, kolluk kuvvetleri ve ilgili diğer tarafların sürecin her aşamasını dikkatlice uygulaması ve sürekli olarak geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, dijital suçlarla mücadelede daha başarılı ve etkili stratejiler geliştirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Adli bilişim, birebir kopya, inceleme süreci.

## New Digital Forensics Investigation Process (NDFIP)

**Abstract:** This study aims to develop the New Digital Forensics Investigation Process (YABIS) in response to the increasing complexity of digital forensics investigations. A comparative analysis of existing digital forensics processes at both national and international levels has been conducted to design a comprehensive and legally compliant process. YABIS offers an extensive approach that includes critical stages such as preparation and the return of evidence, which are often overlooked. This process has the potential to enhance the efficiency of digital forensic investigations, preserve the integrity of evidence, and ensure the reliable use of digital evidence in legal proceedings. The research emphasizes the importance of digital forensics experts, law enforcement, and other relevant parties meticulously implementing each stage of the process and continuously improving it. Through this approach, more successful and effective strategies can be developed in the fight against digital crimes.

**Key words:** Computer forensic, image, examination process.

### 1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte, dijital medyanın suç oluşturan eylemler ile birlikte kullanılmasıyla, suçu aydınlatmakla görevli kolluk kuvvetleri de dijital materyali dikkate almaya başladılar. İlk dijital verilerin suçu aydınlatmada kullanılması 1984 yılına kadar dayanmaktadır [1]. 1984 yılında FBI (Federal Bureau of Investigation- Federal Soruşturma Bürosu) laboratuvarı ve diğer kolluk kuvvetleri tarafından bilgisayar kalıntılarını incelemek için bir program geliştirmeye başlandı ve bilgisayar incelemeleri için Computer Analysis Response Team (CART) kuruldu [2]. 1991 yılının başlarında altı (6) uluslararası kolluk kuvvetinden oluşan bir grup, Amerika Birleşik Devletlerinde birleşik adli bilişimi ve incelemede standart bir yaklaşımı belirleme konularını tartıştı. 1993 yılında, FBI'nin ev sahipliğinde düzenlenen Uluslararası Kolluk Kuvvetleri Konferansı'na adli bilişim konusunda ulusal ve uluslararası düzeyde 70 temsilci katıldı. Konferans sonunda katılımcılarca adli bilişim standartlarının eksikliği ve bu konuda bir standartlara ihtiyaç olduğunu kabul edildi.

1995 yılında Amerika Birleşik Devletleri Gizli Servisi tarafından yürütülen bir araştırma, kolluk kuvvetlerinin yaklaşık %48'inin adli bilişim laboratuvarına sahip olduğu ve bilgisayar kanıtlarının %68'inin bu laboratuvarlara gönderildiği belirlendi. Yine bu araştırma laboratuvarlarının %70 inde yazılı bir prosedürünün olmadığını gösterdi [1]. 1995 yılından itibaren tespit edilen bu eksikliğin giderilmesine yönelik “adli bilişim inceleme süreçleri” tasarlanmaya başlandı.

\* Sorumlu yazar: [ramazan.oguz@ogr.iuc.edu.tr](mailto:ramazan.oguz@ogr.iuc.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7297-4141, <sup>2</sup> 0000-0002-4282-6340



## 2. Adli Bilişimde İnceleme Süreçleri

Literatürde, suç soruşturmalarında olayların yeniden inşasını kolaylaştırmak veya ilerletmek amacıyla dijital kaynaklardan elde edilen kanıtları bilimsel bir yol izleyerek gerçeğe uygun değerlendirilmesi için adli bilişim süreçleri ile ilgili birçok süreç geliştirilmiştir [3]. Uluslararası alanda geliştirilen bu süreçlerden 19'u bu çalışmada incelenmiştir. İncelenen süreçlere ve süreçlerin aşamalarına ait bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Uluslararası alanda tasarlanan adli bilişim inceleme süreçleri.

Adli Bilişim İnceleme Süreçleri	Aşamaları
Bilgisayar Adli İnceleme Süreci (Computer Forensic Investigative Process)[4]	Acquisition - Identification - Evaluation - Admission as evidence
Dijital Adli Bilişim Araştırma Çalıştayı (Digital Forensics Research Workshop (DFRWS)) [5]	Identification- Preservation - Collection - Examination - Analysis - Presentation - Decision
Bilimsel Olay Yeri İnceleme Modeli (Scientific Crime Scene Investigation Model) [6]	Recognition - Identification - Individualization - Reconstruction
Soyut Dijital Adli Bilişim Modeli (Abstract Digital Forensics Model (ADFM)) [7]	Identification - Preparation - Approach Strategy- Preservation - Collection - Examination - Analysis - Presentation - Returning Evidence
Entegre Dijital İnceleme Süreci (Integrated Digital Investigation Process (IDIP)) [8]	Readiness - Deployment - Physical Crime Investigation/ Digital Crime Investigation - Review
Uçtan Uca Dijital İnceleme (End to End Digital Investigation) [9]	Collecting evidence - Analysis of Individual Events - Preliminary Correlation - Event Normalization - Event Deconfliction - Second Level Correlation - Timeline Analysis - Chain of evidence Construction - Corroboration
Siber Suç İncelemeleri Genişletilmiş Modeli (Extended Model of Cybercrime Investigations ) [10]	Awareness - Authorization - Planning - Notification - Search and Identify - Collection - Transport - Storage - Examination Hypotheses - Presentation - Proof/Defance - Dissemination
Olaya Dayalı Dijital Adli Bilişim İnceleme Çerçevesi (Event-based Digital Forensic Investigation Framework) [11]	Preservation - Search - Reconstruction
Gelişmiş Dijital İnceleme Süreci Modeli (Enhanced Digital Investigation Process Model) [12]	Readiness - Deployment - Traceback - Dynamite - Review
Dijital İncelemeler Süreci için Hiyerarşik, Amaç Tabanlı Çerçeve (Hierarchical, Objective-Based Framework for the Digital Investigations Process) [13]	Preparation - Incident Response - Data Collection - Data Analysis - Presentation of Findings - Incident Closure
Dijital Adli Bilişim İncelemesi için Çerçeve (Framework for a Digital Forensic Investigation) [14]	Preparation - Investigation - Presentation
Bilgisayar Adli Bilişim Alan Triyaj Süreci Modeli (The Computer Forensic Field Triage Process Model (CFFTPM)) [15]	Planning - Triage - Usage/User Profiles - Chronology/Timeline - Internet Activity - Case specific evidence
Adli İşlem (NIST) (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) (Forensic Process (NIST) (National Institute of Standards and Technology)) [16]	Collection - Examination- Analysis - Reporting
Olay ve Bilgisayar Adli Bilişimi için Ortak Süreç Modeli (Common Process Model for Incident and Computer Forensics) [17]	Pre Analysis Phase - Analysis Phase - Post Analysis Phase
Çift Veri Analiz Süreci (Dual Data Analysis Process) [18]	Access - Acquire - Analyse - Report
Malezya İnceleme Sürecine Dayalı Dijital Adli Bilişim Modeli (DFMMIP) (Digital Forensics Model based on Malaysian Investigation Process (DFMMIP)) [19]	Planning - Identification - Reconnaissance - Transport & Storage - Analysis Proof & Defense - Archive Storage
European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI)- Best Practice Manual for the Forensic Examination of Digital Technology - Avrupa Adli Bilim Enstitüleri Ağı (ENFSI)- Dijital Teknolojinin Adli İncelemesi için En İyi Uygulama Kılavuzu [20]	Identify - Acquire - Analysis - Report
SWGDE Best Practices for Computer Forensic Examination [21]	Preparation - Considerations - Triage - Acquisition - Examination – Report - Preservation
Digital Forensics and Incident Response (DFIR) Framework for Operational Technology (OT)(NIST) [22]	Collection - Examination - Analysis - Reporting

Ulusal alanda tasarlanan adli bilişim süreçleri incelendiğinde, 2004 yılında 5271 sayılı Ceza Muhakemesi Kanununun (CMK) yürürlüğe girmesi ile birlikte, 134. maddesinde bilgisayar ve kütüklerinde yapılacak aramaların

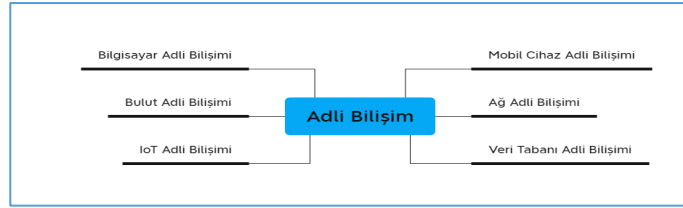
ve incelemelerin tanımlanması yapılmıştır. Müteakibinde hukuk sistemimize uygun adli bilişim süreçleri tasarlanmaya başlanmıştır. Tasarlanan bu süreçlerden altı (6)'sı bu çalışma kapsamında incelenmiştir. İncelenen süreçlere ve süreçlerin aşamalarına ait bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Ulusal alanda tasarlanan adli bilişim inceleme süreçleri.

Adli Bilişim İnceleme Süreçleri	Aşamaları
Doç.Dr. Leyla Berber Keser'e göre [23]	Toplama - İnceleme - Analiz Etme - Belge Hazırlama - Raporlama
Doç.Dr. Ahmet Koltuksuz'a göre [24]	Tanımlama - Elde Etme - Saklanması - İnceleme - Mahkemeye Sunum
Jandarma Kriminal Daire Başkanlığına göre [25]	Elde Etme - Tanımlama - Değerlendirme - Sunum
Yrd.Doç.Dr. Türkay HENKOĞLU'na göre [26]	Delillerin tespit edilmesi, toplanması ve muhafazası -Delilleri açığa çıkartma, inceleme ve analiz yapılması - Delillerin raporlanması
Yrd.Doç.Dr. Hüseyin ÇAKIR'a göre [27]	İlk Müdahale - Delil Toplama - Analiz - Rapor
Doç.Dr. Harun ARTUNER'e göre [28]	Elde Etme - Tanımlama - Değerlendirme - Sunum

### 3. Adli Bilişim İnceleme Süreçlerinin Analizi

Adli bilişim terimi başlangıçta adli bilişim ile ilgili olarak kullanılırken, bugün dijital verileri üreten ve depolayan tüm cihazların araştırılmasını sağlamak için birçok alt dala bölünerek genişlemiştir [29]. Adli bilişim, dijital cihazların ve verilerin türü ile ilgili olarak çeşitli alt dallara ayrılmıştır; bu dallar başlıca Şekil 1'de gösterildiği gibi bilgisayar adli bilişimi, bulut adli bilişimi, IoT (nesnelerin interneti) adli bilişimi, mobil cihaz adli bilişimi, ağ adli bilişimi ve veri tabanı adli bilişimidir [30].



**Şekil 1.** Adli bilişimin alt dalları.

Uluslararası alanda tasarlanmış olan adli bilişim inceleme süreçlerine ait aşamalar Şekil 2 ve Şekil 3'te, ulusal alanda tasarlanmış adli bilişim inceleme süreçlerine ait aşamalar ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Tüm bu süreçler analiz edildiğinde,

- Aynı aşamanın farklı isimlerde (Readiness, Preparation, Authorization, Approach Strategy, Deployment; Acquisition, Acquire, Collecting Evidence, Collection, Data Collection) tanımlanmış olduğu,
- Bazı süreçlerin [4, 6, 11, 14, 16, 18, 20, 21, 22] konuyu genel çerçevede değerlendirirken, bazı süreçlerin [5, 7, 8, 10, 13, 15, 19] ise ayrıntılı bir şekilde tanımlandığı,
- [9, 16, 22] numaralı çalışmalarda, toplama aşaması ile süreçlerin başladığı,
- [8, 12, 13, 15, 19, 21] numaralı çalışmalarda, hazırlık aşaması ile süreçlerin başladığı, [10] numaralı çalışmada ise hazırlık aşamasına önem verildiği ve 3 alt aşamada tanımlandığı,
- Bazı süreçlerin [9, 15] inceleme/analiz aşamasına önem verdiği ve detaylandırdığı, [17] numaralı çalışmanın ise süreçlerini analiz aşamasına göre (analiz öncesi, analiz ve analiz sonrası) şekillendirdiği
- [7, 13] numaralı çalışmalarda delillerin iadesi aşamasına yer verildiği,
- [8] numaralı çalışmada, birçok aşamayı genel bir alt aşamada (fiziksel suç incelemesi, dijital suç incelemesi şeklinde) tanımladığı,
- [7, 13] numaralı çalışmalarda delillerin iadesi aşamasına yer verildiği,
- [23-28] numaralı süreçlerde hazırlık aşaması ve delillerin iadesi aşamasının bulunmadığı anlaşılmıştır. Görüldüğü üzere adli bilişim geniş kapsamlı bir disiplin olduğundan tasarlanan adli bilişim inceleme süreçleri de çoğunlukla alt adli bilişim dallarına göre şekillenmektedir.

#### 4. Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)

Adli bilişimin alt dalları kapsamlı olduğundan tasarlanan adli bilişim inceleme sürecinin de tüm dalları kapsar nitelikte olması gerekmektedir. Eksiksiz bir inceleme sürecinin delil teslim zinciri (Chain of Custody) bakış açısıyla gerçekleşebilmesi için, sürecin hazırlık aşaması ile başlayıp delillerin iadesi aşaması ile son bulması gerektiği değerlendirilmektedir [31].

Bu çalışma kapsamında incelenen adli bilişim süreçlerinden [7, 13] numaralı süreçler dışında tüm aşamaları kapsayan başkaca bir sürecin bulunmadığı anlaşılmıştır. [7, 13] numaralı süreçlerin hazırlık aşaması ile başlayıp delillerin iadesi aşaması ile son bulduğu görülmektedir. Fakat iade aşamasının delillerin sahiplerine iadesi olarak açıklanmıştır.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan adli bilişim inceleme süreci de [7, 13] numaralarda belirtilen çalışmalar gibi kapsamlı bir şekilde tanımlanmış ve olay yeri inceleme safhaları [32] çerçevesinde değerlendirilmiştir. Tasarlanan adli bilişim inceleme sürecinin dört (4) aşamadan oluşması gerektiği değerlendirilmiştir. Bunlar, Hazırlık Aşaması, Delillerin Tespit Edilmesi, Toplanması, Muhafazası ve Laboratuvara Gönderilmesi Aşaması, Deliller Üzerinde Gerekli İnceleme ve Analiz Faaliyetleri Aşaması ve İnceleme Sonucu Raporlama ve Delillerin İadesi Aşamasıdır.

##### 4.1. Hazırlık aşaması

Çalışmada ulusal düzeyde tasarlanan süreçler içerisinde belirtilmeyen hazırlık ve delillerin iadesi aşaması bulunmaktadır. Hazırlık aşaması iki (2) yönlü olarak değerlendirilmiştir. Birincisi, hukuki hazırlıktır. Biraz açmak gerekirse, öncelikle olay yerinde bilişim delillerinin toplanması için gerekli olan yasal izinlerin [33] alınması gerekmektedir. Gerekli yasal izni olmayan bir delile teknik açıdan doğru müdahale edilse bile, hukuka aykırı olarak elde edilmiş olan deliller mahkeme tarafından bir vakanın ispatında dikkate alınmaz hükmü uyarınca mahkeme tarafından delil olarak kabul edilmeyecektir [34]. Bir diğeri ise gerekli teknik donanımı yetersiz olan bir kolluk görevlisinin delile müdahalesi geriye döndürülemeyecek hatalara yol açacak ve bir sonraki aşamada inceleme yapan uzman/bilirkişilerin incelemelerine olumsuz bir etki yapacaktır.

##### 4.2. Delillerin tespit edilmesi, toplanması, muhafazası ve laboratuvara gönderilmesi aşaması

Adli bilişimin başladığı nokta, el koymanın başladığı noktadır. Dolayısıyla, sürecin başladığı yer olan olay yerinde (içinde delillerin bulunduğu alan) yapılan incelemede yapılan hatalar, delillerin gerçekliğine ve güvenilirliğine gölge düşüreceği için tüm süreci sekteye uğratabilir [21]. Bu nedenle deliller, öncelikli olarak tespit edildikten sonra usulüne uygun bir şekilde toplanır ve muhafaza altına alınır. Müteakip aşamada gerekli incelemelerin yapılabilmesi amacıyla laboratuvara gönderilir. Delilin olay yerinde tespitinden laboratuvara gönderilme aşamasına kadar olan süreç ardışık ve genellikle de aynı kişiler tarafından gerçekleştirildiğinden sürecin tamamı bir bütün olarak değerlendirilmiştir.

##### 4.3. Deliller üzerinde gerekli inceleme ve analiz faaliyetleri aşaması

İncelenmek üzere gelen delillerin bir dizi kontrol işlemleri gerçekleştirildikten sonra eksik bulunmaması durumunda (talep yazısı, mahkeme kararı, delil torbalarının mühürlü ve sağlam olması vb.) inceleme ve analiz faaliyetlerine geçilir. Gelen delilin öncelikli olarak alınabiliyorsa kopyası (imajı) alınır (Şekil 5) ve talep edilen tüm incelemeler kopya üzerinden gerçekleştirilir.

Ramazan OĞUZ, Recep ERYİĞİT

AŞAMALAR/ ALT AŞAMALAR	2				3	4		
	Hazırlık Aşaması	Delillerin Tespit Edilmesi,	Toplanması,	Muhafazası	ve Laboratuvara Gönderilmesi Aşaması	Deliller Üzerinde Gerekli İnceleme ve Analiz Faaliyetleri Aşaması	İnceleme Sonucu Raporlama	ve Delillerin İadesi Aşaması
Kazanım/edinme/ımar alma (Acquisition)			X					
Kazanım/edinme/ımar alma (Acquire)			X					
Erişim (Access)		X						
Kabul (Admission)							X	
Analiz (Analyse)						X		
Analiz (Analysis)						X		
Bireysel Olayların Analizi (Analysis of Individual events)						X		
Analiz Aşaması (Analysis Phase)						X		
Yaklaşım Stratejisi (Approach Strategy)	X							
Arşiv Depolama (Archive Storage)				X				
Yetkilendirme (Authorization)	X							
Farkındalık (Awareness)	X							
Özel Vaka Kanıtları (case specific evidence)						X		
Kamıt Zinciri Oluşturma (Chain of evidence Construction)					X			
Kronoloji/Zaman Çizelgesi (chronology/timeline)						X		
Kamıt Toplama (Collecting Evidence)			X					
Toplama (Collection)			X					
Değerlendirme (Consideration)						X		
Doğrulama (Corroboration)						X		
Veri Analizi (Data Analysis)						X		
Veri Toplama (Data Collection)			X					
Karar (Decision)							X	
Görevlendirme (Deployment)	X							
Dijital suç incelemesi (Digital Crime Investigation)					X			
Dağıtım (Dissemination)							X	
Fiziksel Suç Mahalli İnceleme Aşaması (Dynamite)				X				
Değerlendirme (Evaluation)						X		
Olayın Uyuşmazlığını Giderme (Event Deconfliction)						X		
Olay Normalleştirme (Event Normalization)						X		
İnceleme (Examination)						X		
Hipotezler (Hypotheses)							X	
Tanımlama (Identification)	X							
Tanımlama (Identify)	X							
Olayın Kapanışı (Incident Closure)								X
Olaya Müdahale (Incident Response)		X						
Kişiselleştirme (Individualization)						X		
Araştırma (Investigation)						X		
İnternet Aktivitesi (Internet activity)						X		
Bildirim, her iki tarafada bilgi verme (Notification)	X							
Fiziksel Suç Araştırması (Physical Crime Investigation)					X			
Planlama (Planning)	X							
Analiz Sonrası Aşama (Post-Analysis Phase)								X
Analiz Öncesi Aşama (Pre-Analysis Phase)				X				
İlk ilişkilendirme (Preliminary Correlation)							X	
Hazırlık (Preparation)	X							
Sunum (Presentation)							X	

Şekil 2. Uluslararası adli bilişim inceleme süreçleri.

Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)

AŞAMALAR/ALT AŞAMALAR	1	2				3	4	
	Hazırlık Aşaması	Delillerin Tespit Edilmesi,	Toplanması,	Muhafazası	ve Laboratuvara Gönderilmesi Aşaması	Deliller Üzerinde Gerekli İnceleme ve Analiz Faaliyetleri Aşaması	İnceleme Sonucu Raporlama	ve Delillerin İadesi Aşaması
Bulguların Sunumu (Presentation of Findings)							X	
Koruma(Preservation)				X				
İspat&Savunma (Proof&Defence)							X	
Hazırlık(Readiness)	X							
Tanıma(Recognition)		X						
Arama/Keşif(Reconnaissance)		X						
Yeniden Yapılandırma (Reconstruction)						X		
Rapor(Report)							X	
Raporlama(Reporting)							X	
Kanıtların İadesi (Returning Evidence)								X
Gözden Geçirme(Review)							X	
Araştırma(Search)						X		
Arama ve Tanımlama (Search and Identify)		X						
İkinci Seviye İlişkilendirme (Second Level Correlation)						X		
Depolama (Storage)				X				
Zaman Çizelgesi Analizi (Timeline Analysis)						X		
Geri İzleme(Traceback)				X				
Taşıma(Transport)					X			
Taşıma&Depolama (Transport&Storage)					X			
Ön Değerlendirme(Triage)				X				
Kullanım/Kullanıcı Profilleri (Usage/User Profiles)						X		

Şekil 3. Uluslararası adli bilişim inceleme süreçlerinin devamı.

AŞAMALAR/ALT AŞAMALAR	1	2				3	4	
	Hazırlık Aşaması	Delillerin Tespit Edilmesi,	Toplanması,	Muhafazası	ve Laboratuvara Gönderilmesi Aşaması	Deliller Üzerinde Gerekli İnceleme ve Analiz Faaliyetleri Aşaması	İnceleme Sonucu Raporlama	ve Delillerin İadesi Aşaması
Analiz						X		
Analiz Etme						X		
Belge Hazırlama							X	
Değerlendirme						X		
Delilleri açığa çıkarma, inceleme ve analiz yapılması						X		
Delillerin tespit edilmesi, toplanması ve muhafazası		X	X	X				
Delil toplama			X					
Delillerin raporlanması							X	
Elde Etme		X						
İlk müdahale		X						
İnceleme						X		
Mahkemeye Sunum							X	
Rapor							X	
Raporlama							X	
Saklanması				X				
Sunum							X	
Tanımlama		X						
Toplama			X					

Şekil 4. Ulusal adli bilişim inceleme süreçleri.



Şekil 5. Birebir kopya alma işlemleri.

#### 4.4. İnceleme sonucu raporlama ve delillerin iadesi aşaması

İncelemeler sonucunda tespit edilen bilgiler ışığında bir rapor tanzim edilir. Rapor içeriğinin anlaşılır bir dille yazılmasına ve talep edilen isteklere cevap verir nitelikte olmasına özen gösterilir. Rapor tanzim işlemleri de tamamlandıktan sonra delillerin iadesi aşamasına geçilir. Tasarlanan bu sürecin diğer yeni aşaması ise delillerin iadesi aşamasıdır. Delillerin iadesi konusunun çok önemli bir aşama olduğu değerlendirilmektedir. Çünkü adli bir incelemenin tamamlanması ve raporunun düzenlenmesi ile birlikte ihtimal dahilinde, incelemeyi yapan kişi/kurum tarafından inceleme son bulmuş olabilir; diğer taraftan, bir incelemenin sonu başka bir incelemenin başlangıcı olabilecektir. Sağlıklı bir incelemenin yapılabilmesi için en başta delilin sağlam (incelenebilir) olması gerekmektedir. Delilin süreç içerisinde hasar görmesi durumunda üzerinde herhangi bir inceleme yapılamayacaktır. Bu nedenle inceleme süreçleri tasarlanırken kesinlikle delilin iadesi (delilleri gönderen makama), sürecin bir aşaması olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

#### 5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, dijital suçların artan oranına ve adli bilişim incelemelerinin karmaşıklığına yanıt olarak Yeni Adli Bilişim İnceleme Süreci (YABİS)'nin geliştirilmesi ve uygulanması gerekliliğini vurgulamaktadır. Ulusal ve uluslararası alandaki mevcut adli bilişim süreçlerinin karşılaştırmalı analizi, YABİS'in kapsamlı ve çok yönlü bir yaklaşım sunarak adli bilişim incelemelerini daha etkin bir şekilde yönlendirebileceğini göstermektedir. YABİS, adli bilişim süreçlerinde sıklıkla göz ardı edilen hazırlık ve delillerin iadesi gibi kritik aşamaları içerecek şekilde tasarlanmıştır.

Tartışma bölümünde, YABİS'in diğer süreçlerden farklılaşan yönleri ve bu yeni sürecin adli bilişim incelemelerine sağlayabileceği potansiyel avantajlar ele alınmıştır. Sürecin, adli bilişim alt dallarını geniş bir şekilde kapsayarak daha kapsamlı bir inceleme imkanı sunması, delillerin daha sistemli bir şekilde toplanması, muhafaza edilmesi ve analiz edilmesini sağlaması beklenmektedir.

Sonuç olarak, YABİS, adli bilişim alanında karşılaşılan zorluklara ve ihtiyaçlara yönelik olarak tasarlanmış bir süreçtir. Geliştirilen bu yeni süreç, adli bilişim incelemelerinin etkinliğini artırma, delillerin bütünlüğünü koruma ve adli süreçlerde dijital kanıtların daha güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlama potansiyeline sahiptir. YABİS'in başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, adli bilişim uzmanları, kolluk kuvvetleri ve ilgili diğer tarafların sürecin her aşamasını dikkatlice uygulaması ve sürekli geliştirilmesi önemlidir. Bu sayede, dijital suçlarla mücadelede daha etkili ve verimli bir yol izlenebilir.

## Kaynaklar

- [1] Noblett MG, Pollitt MM, Presley LA. Recovering and Examining Computer Forensic Evidence, *Forensic Science Communications*. 2000; 2(4): pp. 1-13.
- [2] Digital Forensics. <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/digital-forensics/content-section-4.2>. Erişim Tarihi: 30.03.2024.
- [3] Peasah KO, Quayson E, Agyei O, Ansong ED. Survey of Digital Forensic Models and Proposed Thematic Scheme. *Int J Comput Appl Technol*, 2017;169(11): pp. 41–45.
- [4] Pollitt MM. Computer Forensics: An Approach to Evidence in Cyberspace. *Proc Natl Inf Syst Secur Conf*, 1995; pp. 487-491.
- [5] Palmer G. A Road Map for Digital Forensic Research. DFRWS; Aug 7th – 8th 2001; Utica, NY.
- [6] Sachowski J. Implementing Digital Forensic Readiness: From Reactive to Proactive Process. England: Taylor & Francis Group, 2021.
- [7] Reith M, Carr C, Gunsch G. An Examination of Digital Forensics Models. *Int J Digit Evid*, 2002; 1(3).
- [8] Carrier BD, Spafford E. Getting Physical with the Digital Investigation Process. *Int J Digit Evid*, 2003; 2(2), pp. 1-20.
- [9] Stephenson PA. Comprehensive Approach to Digital Incident Investigation. *Inf Secur Tech Rep*, 2003; 8(2), pp. 42-52.
- [10] Ciardhuain S. An Extended Model of Cybercrime Investigation. *Int J Digit Evid*, 2004; 3(1): pp. 1-22.
- [11] Carrier B, Spafford EH. An Event-based Digital Forensic Investigation Framework. *Conf DFRWS*; Aug 11th – 13th 2004; Baltimore, MD.
- [12] Baryamereeba V, Tushabe F. The Enhanced Digital Investigation Process Model. *Conf DFRWS*; Aug 11th – 13th 2004; Baltimore, MD.
- [13] Beebe NL, Clark JG. A Hierarchical, Objective-Based Framework for the Digital Investigations Process. *Proc DFRWS*, 2005; 2(2): pp. 147-167.
- [14] Kohn M, Olivier MS, Eloff JHP. Framework for a Digital Forensic Investigation. *Proceedings of the ISSA 2006 from Insight to Foresight Conference*; 5-7 July 2006; Balalaika Hotel, Sandton, South Africa.
- [15] Rogers MK, Goldman J, Mislán R, Wedge T, Debrotá S. Computer Forensic Field Triage Process Model. *Journal of Digital Forensics, Security and Law*. 2006; Vol. 1(2): pp. 27-40.
- [16] Kent K, Chevalier S, Grance T, Dang H. Guide to Integrating Forensic Techniques into Incident Response. *NIST Spec Publ* 2006; 800-86: pp. 3-1.
- [17] Freiling FC, Schwittay B. A Common Process Model for Incident and Computer Forensics. *Conf IT Incident Mgmt IT Forensics IMF* 2007; Sep 11th – 13th 2007; Stuttgart, Germany.
- [18] Bem D, Huebner E. Computer Forensic Analysis in a Virtual Environment. *Int J Digit Evid*, 2007; 6(2):pp. 1-13.
- [19] Sundresan P. Digital Forensic Model Based on Malaysian Investigation Process, *Int J Comput Sci Netw Secur*, 2009; 9(8).
- [20] ENFSI, Best Practice Manual for the Forensic Examination of Digital Technology. ENFSI-BPM-FIT, Version 01, 2015;17.
- [21] Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE), Best Practices for Computer Forensic Examination. 2018; pp. 1-11.
- [22] Salfati E, Pease M. Digital Forensics and Incident Response (DFIR) Framework for Operational Technology (OT). *NIST*. 2022; pp. 1-58
- [23] Berber LK. Adli Bilişim (Computer Forensic), Ankara: Yetkin Yayınları, 2004.
- [24] Koltuksuz A. Adli Bilişime Giriş. Adli Bilişim Günü, Yaşar Üniversitesi, İzmir, 2010.
- [25] Jandarma Kriminal Daire Başkanlığı, Adli Bilimler II, 2011;217,218.
- [26] Henkoğlu T. Adli Bilişim: Dijital Delillerin Elde Edilmesi ve Analizi, Ankara: Pusula Yayıncılık, 2014.
- [27] Çakır H, Kılıç MS. Adli Bilişim ve Elektronik Deliller, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2014.
- [28] Artuner H. Adli Bilişim Alanında Dijital Delil, Delil Karartma, Delil Toplama, 2015.
- [29] Reith M, Carr C, Gunsch G. An examination of digital forensic models. *Int J Digit Evid*, 2002; pp. 1-12.
- [30] Uysal Z, Forensic Analysis of Social Network Application on Smartphones. Master's Thesis, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 2021.
- [31] Oğuz R, Adli Bilişimde İnceleme Süreçleri. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fiziki İncelemeler ve Kriminalistik Yüksek Lisans Programı, 2018.
- [32] Hancı İH, Vural O. Adli Bilimler ve Kriminalistik Ansiklopedisi, Adli Mühendislik ve Adli Bilişim -1- 2023; 4903.
- [33] 5271 Sayılı Ceza Muhakemesi Kanunu (CMK), madde:127, 134.
- [34] 6100 Sayılı Hukuk Muhakemeleri Kanunu (HMK), madde: 189/2.

## Modeling of Li-ion Battery Management System for Unmanned Aerial Vehicles

Merve Nur KAYA<sup>1</sup>, Zehra URAL BAYRAK<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Avionics, School of Aviation, Firat University, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup> merve.nur.kayaa@gmail.com, <sup>2\*</sup> zural@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/02/2024;

Kabul/Accepted: 05/06/2024)

**Abstract:** Nowadays, systems that use more electricity in aircraft are increasing due to harmful gas emissions. This increase has created the need to store electrical energy and accelerated the trend towards battery technologies. Since energy storage in batteries occurs as a result of chemical reactions, problems may occur that will damage the battery group or the entire system. These problems are caused by high current, voltage, and temperature, which affect the reaction rate during battery charging/discharging. A Battery Management System (BMS) is needed to prevent problems and to use the required electrical energy safely.

In this study, it is aimed to meet the energy needs of the system in a controlled manner by disabling only the damaged cell in case of problems that may occur in the cells in the battery. For this purpose, a model of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system been created by adding a BMS block to each cell to control the battery cells. The BMS model is realized based on the cell temperature, the State of Charge (SoC) value of the cell, and the output voltage values of the cell. The UAV system is modeled using MATLAB/Simulink environment. Thanks to the proposed BMS, in case of a problem that may occur in any cell in the battery, that cell will be disabled and the required energy will be met through the remaining cells. It is observed from the results obtained that when the cell parameters become normal, it continues to feed the system again.

**Key words:** Li-ion, battery, battery management system, UAV.

### İnsansız Hava Araçları için Li-iyon Batarya Yönetim Sisteminin Modellenmesi

**Öz:** Günümüzde zararlı gaz emisyonları nedeniyle uçaklarda daha fazla elektriğin kullanıldığı sistemler artmaktadır. Bu artış elektrik enerjisinin depolanması ihtiyacını doğurarak batarya teknolojilerine olan yönelimi hızlandırmıştır. Bataryalarda enerji depolanması kimyasal tepkimeler sonucu olduğundan batarya grubuna veya tüm sisteme zarar verecek problemler oluşabilir. Bu problemlere batarya şarj/deşarj esnasında tepkime hızını etkileyen yüksek akım, gerilim ve sıcaklık neden olmaktadır. Problemlerin oluşmaması ve ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin güvenli bir şekilde kullanılması için Batarya Yönetim Sistemine (BYS) ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada bataryada bulunan hücrelerde oluşabilecek problemlerde, sadece bozuk hücre devre dışı bırakılarak sistemin enerji ihtiyacının kontrollü bir şekilde karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, batarya hücrelerini kontrol etmek için her hücreye bir BYS bloğu eklenerek, İnsansız Hava Aracı (İHA) sisteminin modeli oluşturulmuştur. Hücre sıcaklığı, hücrenin şarj durumu ve hücrenin çıkış gerilim değerleri baz alınarak BYS modeli gerçekleştirilmiştir. İHA sistemi MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen BYS sayesinde bataryadaki herhangi bir hücrede oluşan problem anında hücre devre dışı bırakılmış, ihtiyaç duyulan enerji ise kalan hücreler üzerinden karşılanmıştır. Batarya hücrelerinin parametreleri normal hale geldiğinde ise hücrenin tekrar sistemi beslemeye devam ettiği elde edilen sonuçlardan gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Li-iyon, batarya, batarya yönetim sistemi, İHA.

#### 1.Introduction

With the development of today's technology, human-induced harmful gas emissions are increasing. This increase causes climate changes and global warming and puts the lives of living things at risk. Fossil fuels used in transportation cause great harm to nature. Renewable energy sources are of great importance in reducing the damage caused by these fuels to the environment [1]. There is a need to use 'more electric' technologies to save fuel, reduce environmental damage, and costs [2]. Emissions created by aircraft propulsion systems at airports and during flight are one of the most important problems in the aviation industry. More electrical systems have begun to be used in aircraft to reduce emissions. Thus, the use of batteries to store electrical energy in the aviation field has become widespread [3].

Nowadays, Lithium Ion (Li-ion) batteries are more widely preferred because they have advantages such as energy-to-weight ratio and lower self-discharge rate when not working compared to other battery technologies, and they cause less harm to the environment than other battery types [4]. The most important disadvantage of Li-ion batteries is the aging problem that occurs due to capacity decrease, regardless of whether they are in use or

\* Corresponding author: [zural@firat.edu.tr](mailto:zural@firat.edu.tr). ORCID Number of authors: <sup>1</sup> 0009-0009-1707-5360, <sup>2</sup> 0000-0001-8249-0063



not. It must contain a protection circuit, namely the Battery Management System (BMS), to prevent and control problems that may arise due to this aging problem. Thanks to the BMS, the battery group will be controlled and its damage will be prevented [3, 5].

A detailed literature review of some of the recent studies on Li-ion batteries and management systems is given below:

In a study conducted by Üçgün et al. [6], a system was created by designing a BMS module to control the charging process of Lithium polymer batteries used in UAVs with a charging pad. The basic way to find the State of Charge (SoC) is to determine the voltage of the battery. Battery voltage is used as an indicator to evaluate the health and performance of the battery. Therefore, in the mentioned study, the voltage values of the battery during charging were monitored. The study by Wang et al. [7] focused specifically on accurate SoC prediction for electric vehicles and hybrid electric vehicles. The impedance spectrum detection method was integrated into the battery management system. A new model update strategy for an electrochemical impedance spectroscopy-based SoC algorithm was proposed. In a study conducted by Yıldız [8], alternative architectural structures of batteries and BMS designs used in the aviation field were examined for different applications. It has been observed that the requirement-based parametric design of BMS is important for aviation battery management applications. In a study performed by Tarhan et al. [3], a hybrid BMS that can operate and control twelve serially connected Li-ion batteries and twelve serially connected Lithium iron phosphate batteries with two different features through separate ports was designed for electric aircraft. With this design, it was aimed to measure and control the voltage, temperature, current, SoC, and State of Health (SoH) of the battery. Altium program was used for design and LTC6804 microprocessor was used for cell measurements. The system was simulated by adding temperature, current, voltage, pressure and vibration sensors to the microprocessor. As a result of the tests, they concluded that 0.326 W thermal power was consumed to balance the cells by 90%. In a study conducted by Shibl et al. [9], a machine learning-based BMS was modeled for UAVs. For this purpose, they used deep neural networks and long short-term memory models for SoC prediction. For SoH prediction, they proposed an approach that includes four classes on the Random Forest model classification problem. Dündar et al. [10] were evaluated in terms of flight performance to find the required durability under each flight condition, and the selected battery model was modeled in MATLAB/Simulink. Tian et al [11] focused on the energy management system, which is important to ensure the effective operation of UAVs. The authors proposed the Adaptive Hierarchical Energy Management Strategy to increase energy management efficiency. They used the sequential convex optimization method to solve the battery SoC global reference orbit. The concept of electric aircraft and the development of electricity use in aircraft were examined in a study by Yıldız M. [12], and the basic functions and features of the battery and thermal management system were explained in line with the requirements for battery management. Battery types and parameters were examined and the batteries were analyzed in terms of thermodynamics, heat transfer and electrochemistry. It was presented analysis results for determining battery temperature. In the study by Li et al. [13], a smart digital twin model was proposed for BMS using battery data obtained from real driving cycles. The regression model between BMS variables was developed using a backpropagation artificial neural network. A threshold-based error detection method has been applied to diagnose errors in BMS. A one-year dataset collected from the electric vehicle was used to evaluate the performance of the proposed method. Experimental results have shown that faults in BMS can be effectively diagnosed. Khawaja et al [14] examined various methodologies and approaches to predict the SoC and SoH of Li-ion batteries using artificial intelligence methods. It showed that the condition of Li-ion batteries can be accurately predicted using six machine learning methods and can be combined with a BMS to improve electric vehicle performance. Son et al [15] proposed a system in which Li-ion batteries were the main energy source for UAVs and drones. A passive BMS was used for optimal performance. This BMS was designed considering that it operates in various ambient temperatures depending on the flight characteristics of the drone. The inputs for the design and sizing of the battery used in aircraft were examined in a study conducted by Yıldız and Karakoc [16] and design formulas were developed. It was concluded that with these formulas, it would be possible to make predictions for the weight of the battery and capacity iterations during the aircraft design phase.

In this study, the increasing electrical energy need in the aviation field has been met by Li-ion batteries. A BMS has been proposed in order to eliminate and control the security problems that may occur in the battery group of the UAV. The proposed BMS and UAV load are modeled in MATLAB/Simulink environment. SoC and voltage values are instantly monitored by the BMS with measuring instruments connected to the output of the battery. So, the damaged cell is detected based on the cell temperature of the BMS, the SoC value of the cell and the output voltage values of the cell. According to this data, the damaged cell is intervened and the cell is disabled. In this case, the energy need of the system is provided from other cells. The effect of BMS on the system can be seen from the graphics obtained as a result of the simulation. It has been observed that when the cell's values reach normal, it continues to feed the system by producing energy again.

## 2. Li-ion Battery

An electrochemical cell uses reduction and oxidation (redox) reactions to convert chemical energy into electrical energy. A separator plate is placed in the middle of the electrolyte to prevent a short circuit between the electrodes. As a result of the redox reaction that takes place during charging, Li-ions, which have the lowest weight, highest potential and energy among metals, are transferred from the cathode electrode to the anode electrode via the electrolyte and form a compound with the negative electrode. Electron transfer between electrodes is necessary to equalize polarization, but electrons cannot be transferred through the electrolyte due to the separator. Instead, they pass through the external circuit that connects the two electrodes. Since the reactions occurring in this process are two-way, the system can be discharged [17-19]. The chemical reactions occurring in Li-ion batteries, whose cathode and anode are composed of lithium cobalt oxide and carbon graphite, respectively, are given in Equations (1-3) [20].

Cathode Reaction;



Anode Reaction;



Overall Reaction;



Li-ion batteries, which have a lightweight structure, have a cell voltage of approximately 4 V and an energy level of 100-150 Wh/kg [21]. In general, their cycle life is 2000 cycles, power density is 1800 W/m<sup>2</sup>, operating temperature is between -20°C and +60°C, and energy efficiency is 80%. In addition, Li-ion batteries are widely preferred in electric vehicles due to their advantages such as having a very low self-discharge rate, being very stable in terms of thermal stability, having a low maintenance rate and no memory effect [5, 22]. The Li-ion batteries are used in electronic devices such as laptops, MP3 players, and mobile phones [21, 22].

Li-ion batteries selected according to the device to be used are determined by taking into account the chemistry of the battery's own cathode and the physical factors that play a role in its production, such as material density in the electrodes, composition and solid particle size, and cell geometry. The reason why these variables are taken into consideration is that they affect the performance, cost and safety features of the battery [23].

In this study, Li-ion batteries are preferred for use in UAVs. Because the positive characteristics mentioned above make the Li-ion battery stand out from other battery types.

## 3. Battery Management System

Batteries are composed of many cells coming together. The cells in the battery are connected in series to determine the required voltage, and in parallel to determine the current and capacity. BMSs are used to ensure compatibility, control, and operating range of these serial and parallel connections. BMS are electronic systems that prevent the battery from exceeding its operating conditions by controlling the temperature, current, voltage, and load values of the batteries during charging and discharging [20, 24]. One of the important duties of BMS is to protect the battery and prevent it from being damaged. Thus, if the operating conditions are exceeded, the system will be intervened [24].

Li-ion batteries have features such as higher energy and power density and lower self-propagation rate. Thanks to these features, choosing Li-ion batteries in electrical systems will increase the total efficiency of the system. Li-ion batteries can be cost-effective in many cases. These advantages include longer life, higher energy density, faster rechargeability and less maintenance. Their longer life requires them to be replaced less frequently, reducing costs in the long run. Additionally, having greater energy storage capacity per unit can deliver more energy than a battery of the same size or weight, making them more efficient and cost-effective for applications. Li-ion batteries can also generally be charged faster and require less maintenance than other battery types, reducing operating costs. However, determining the most suitable battery technology for a particular application requires consideration of economies of scale, manufacturing technologies, and other factors. Therefore, cost advantage is only one factor and other factors should be considered when making the decision [22]. However, Li-ion batteries are easily affected by the environment and operating conditions, causing safety problems, and a decrease in SoH. Inadequate monitoring and control of preferred Li-ion batteries can cause fires, gas emissions, and explosions when irreversible deterioration occurs. In order to prevent these negative situations from occurring, BMS is needed in Li-ion batteries. BMSs are of great importance for the industrialization and marketing of Li-ion batteries, whose

development and use are increasing [24, 25]. BMSs have four types of topologies: centralized, decentralized, distributed type, and modular type. Figure 1 shows the decentralized BMS topology.

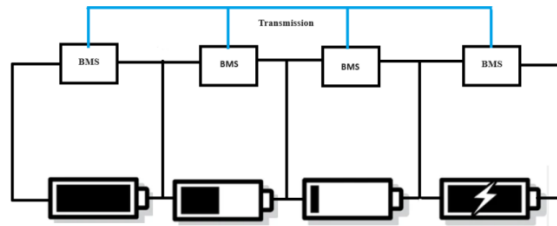


Figure 1. Decentralized BMS.

Decentralized BMS is often used to provide control and management of large amounts of battery packs or battery efficiencies. In the system, many small control units are distributed at different points of the battery pack. Each controller monitors, monitors, and controls several battery cells. These control units usually include a microcontroller and sensors. Sensors constantly monitor battery temperature, voltage, current and other parameters and transmit this data to the microcontroller, providing information about the state of the battery. It enables data sharing by communicating between control units. In this way, a problem observed by a control unit can be shared with other control units and necessary precautions can be taken. Some advantages of decentralized BMS are:

- Each control unit operates independently, ensuring that in the event of a system-wide failure, other control units are not affected.
- As the battery pack expands, new controllers can be easily added and integrated.
- Each control unit can quickly respond to changes in its area.
- Decentralization can increase data security. It does not compromise the entire system, such as an attack on a central control unit.

A decentralized BMS is preferred to control the problems that may occur in the four battery cells in this study according to the determined conditions. Because the control units work independently of each other.

#### 4. UAV Load

UAVs can use various engine types depending on different application areas and performance requirements. Some of the motor types frequently used in the UAVs are Brushless Direct Current Motors (BLDC) motors, gas turbine motors, internal combustion motors, linear motors, ground effect motors.

One of the most common types of motors used in UAVs are BLDC motors. These motors provide high power density, low weight and high efficiency. They also require less maintenance and are long-lasting. BLDC motors are used in a wide range of applications, from multi-rotor drones to UAVs.

Gas turbines can be used to provide powerful thrust in large-sized and long-range UAVs. Gas turbines are engines that can operate at high speeds and usually use jet fuel. These are generally preferred in large UAVs for military or commercial purposes.

Some UAVs use internal combustion engines, especially for scale models or light commercial applications. These engines usually run on gasoline or other fuels and provide long range and payload capacity.

Linear motors can be used as a replacement for traditional rotary motors. Such engines provide linear thrust and can be used in some special applications.

Ground effect engines allow UAVs to take off and land vertically. These motors are often used in multi-propeller drones and allow each propeller to be controlled individually. Depending on the UAVs' design and application requirements, different engine types, and configurations may be preferred [26].

BLDC with permanent magnets is preferred for use in the power drive of UAVs and remotely piloted aircraft systems. BLDC motors transfer electrical power to mechanical power with very little power loss. The power coefficient, which remains in the range of 0.5-0.8 in brushed motors, can be higher than 0.9 in the BLDC motors. This low level of power loss of the BLDC motors allows them to be smaller and lighter [27]. Since BLDC motors are considered a three-phase system, they must be operated with a three-phase power supply. Then, the voltage induced in the stator winding and the voltage applied to the motor must be aligned so that the BLDC motor behaves like a three-phase motor and operates at its best operating point. For this, the position of the rotor must be known at certain angles. Equations (4-6) have been taken into account when creating the armature winding model for the BLDC motor.

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (4)$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (5)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (6)$$

$L$  is the armature self inductance (H),  $R$  is the armature resistance ( $\Omega$ ),  $V_a, V_b, V_c$  is the terminal phase voltage (V),  $i_a, i_b, i_c$  is the motor input current (A), and  $e_a, e_b, e_c$  is the voltage induced in the stator windings (V). The induced voltage in the stator windings is a function of rotor position as it is induced due to rotor motion. The voltage induced in the stator winding of each phase has a phase difference of  $120^\circ$ . The voltage induced in the stator windings can be calculated with Equations (7-9).

$$e_a = K_w f(\theta_e) w \quad (7)$$

$$e_b = K_w f(\theta_e - 2\pi/3) w \quad (8)$$

$$e_c = K_w f(\theta_e + 2\pi/3) w \quad (9)$$

$K_w$  is the constant of the voltage induced in the stator windings of a phase (V/rad.s<sup>-1</sup>),  $\theta_e$  is the electrical rotor angle,  $w$  is the rotor speed (rad. s<sup>-1</sup>). The electrical rotor angle is obtained by multiplying the dipole number  $p$  by the mechanical rotor angle. It can be expressed by Equation (10).

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (10)$$

$\theta_m$  represents the mechanical rotor angle (rad).  $T_e$  is motor torque (N.m) and it can be calculated with the Equation (11).

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w} \quad (11)$$

The torque of the mechanical part is as in Equation (12).

$$T_e - T_l = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (12)$$

Here;  $J$  represents the moment inertia of the engine (in Joule seconds), that is, the resistance of the engine's rotational motion to the speed change, and  $B$  represents the viscous friction coefficient (in Newton meters seconds), that is, the friction loss depending on the speed of the engine. This is the friction force that increases with increasing engine speed. This term describes the mechanical resistance of the motor [28].

## 5. Results and Discussions

The BMS of the UAV proposed in this study is modeled in the MATLAB/Simulink environment. In the system shown in Figure 2, there is a battery group containing four serial Li-ion battery cells. In order to manage the problems that may occur in these cells, a decentralized BMS block that can work independently of each other has been added. A capacitor block is used, which contains active or passive capacitors that disable the damaged battery cell according to the information they received from the BMS block. An inverter is used to convert the Direct Current (DC) voltage obtained from the battery output into Alternative Current (AC) voltage. The BLDC motor block, which represents the UAV load, is connected to the inverter output.

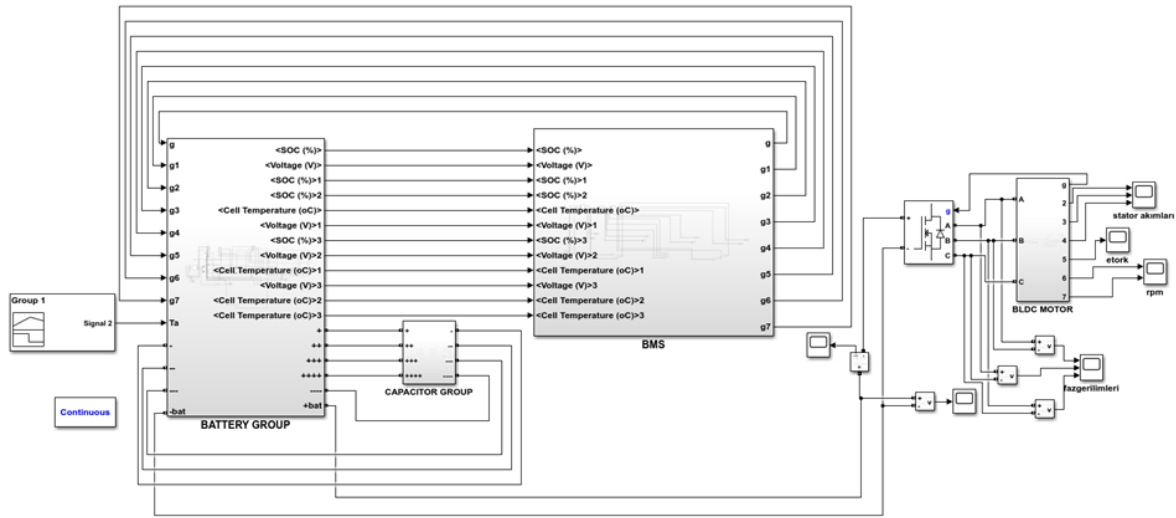


Figure 2. UAV system with BMS.

The battery group subsystem, which includes batteries and switches, is created in MATLAB/Simulink. This subsystem shown in Figure 3 includes four batteries. An ideal switch connected to the batteries is used to make each battery active or passive according to the specified conditions. Depending on whether these switches are on/off, the battery or the capacitor connected to the relevant battery is activated. The status of the switches in transmission is determined by four control mechanisms in the BMS subsystem. The outputs of the decision mechanisms here are connected to the inputs where the transmission conditions of the switches in the battery group subsystem are determined. Depending on whether the switches are in transmission, the battery or capacity will be active. The BMS subsystem used for control purposes can be seen in Figure 4.

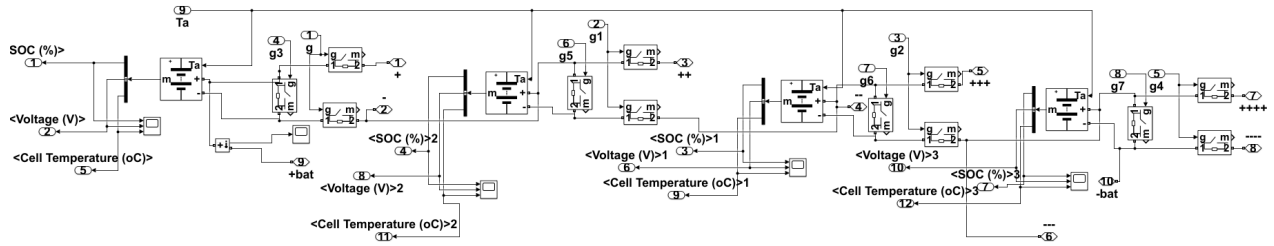


Figure 3. Battery group subsystem.

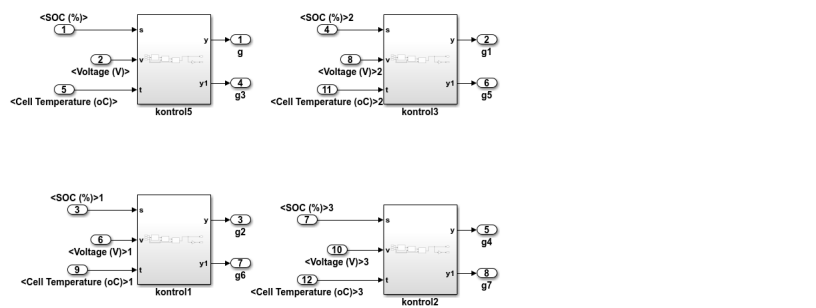


Figure 4. BMS subsystem.

In this study, the Battery Stack cell in MATLAB/Simulink is chosen to model the batteries used in the proposed system. Parameters of this battery; nominal voltage is 25 V, rated capacity is 5.4 Ah, initial state-of-charge is 50 %, 40 %, 75 %, 100 %, maximum capacity is 5.4 Ah, cut-off voltage is 18.75 V, fully charged voltage is 29.0997 V, internal resistance is 0.046296 ohm, capacity at nominal voltage is 4.8835 Ah.

If the batteries fail under specified conditions, the capacities will be activated. Serial RC branch cell in MATLAB/Simulink is used to represent capacities. The parameters determined for the capacities are as follows. Capacitor initial voltage is 25 V, resistance is  $1e^{-9}$  ohm, capacitance is  $1e^{-6}$  F.

Since temperature is one of the factors affecting the SoH of batteries during operation, the temperature of the battery is determined as the input value in this study. In order to measure the battery's response to temperature, an external ambient temperature change is created as shown in Figure 5. The damaged battery cell will be disabled by observing the change in battery temperature within this determined temperature range. Instead of the battery cell, the relevant capacitor from the capacitor group will be activated. The nominal operating temperature of the battery is determined as below 40°C. If the cell temperature rises above 40°C, BMS will activate and disable the cell.

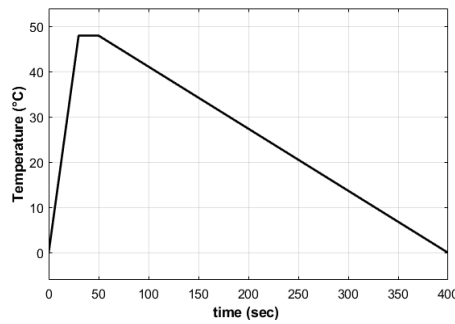


Figure 5. External ambient temperature change.

Figure 6 shows the SoC change graph of the three undamaged cells of the battery consisting of four cells. In undamaged battery cells, it is not possible for the temperature to exceed 40°C or for the output voltage to drop below 24 V. However, if the damaged cell becomes disabled due to the SoC status, the undamaged cells feed this cell. For this reason, the shutdown of undamaged cells is observed only when the SoC change falls below 20%. In other words, at the end of the 350th second, the undamaged cells no longer feed the system. In this case, these cells are disabled by the BMS and the relevant capacities are activated.

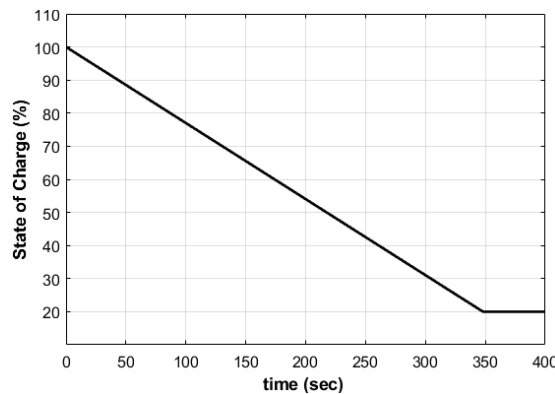


Figure 6. SoC change of undamaged battery cell.

The SoC change of the damaged cell is given in Figure 7. In the initial state, while the cell is active, its SoC decreases over time. SoC remained constant between approximately 35-60 seconds. Because the damaged cell has become disabled due to the increase in temperature. Afterwards, the cell comes into play again, feeding the system and its SoC decreases. However, when the SoC value of the battery cell is below the 20% value determined in the BMS, the BMS charges the cell by activating the relevant capacitor. It is seen that the cell comes into play again after a certain period of time and feeds the load.

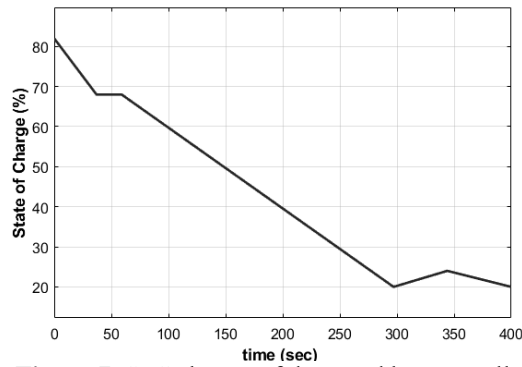


Figure 7. SoC change of damaged battery cell.

Figure 8 shows the output voltage of the battery. If the output voltage of any battery cell determined in the BMS block drops below 24 V, the capacitor group is activated to prevent the output voltage of the battery from decreasing. This will ensure that the voltage at the output of the four-cell battery never drops below 96 V. As can be seen from the figure, although the SoC of the battery cells dropped below 20%, the output voltage never dropped below 96 V. Figure 9 shows the output current change of the battery.

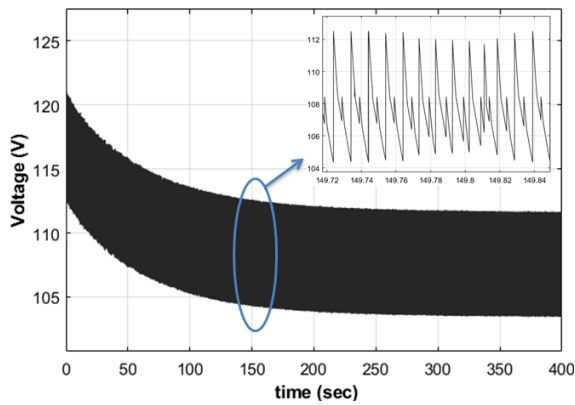


Figure 8. Output voltage of the battery.

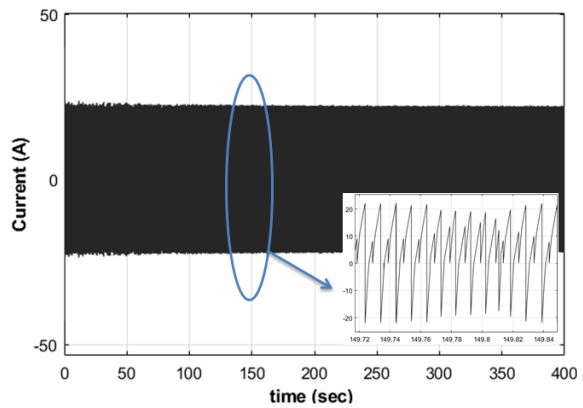


Figure 9. Current change of the battery.

Figure 10 shows the change in voltages between the phases of the three-phase inverter connected to the output of the batteries. Figure 11 indicates the change of stator currents of the BLDC Motor.

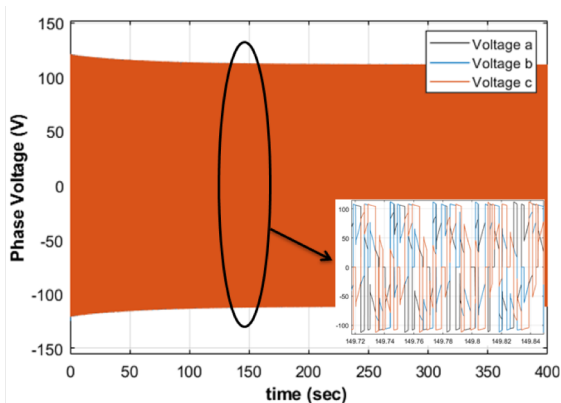


Figure 10. Inverter phase voltages.

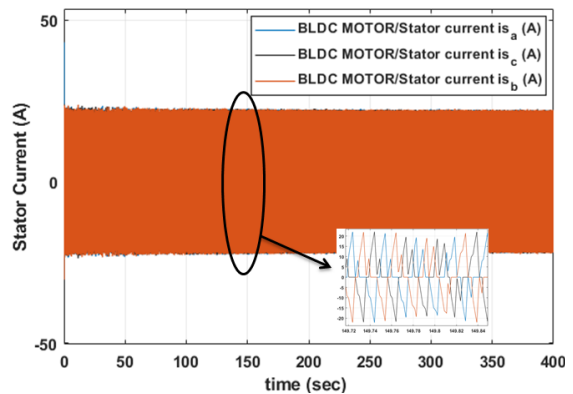
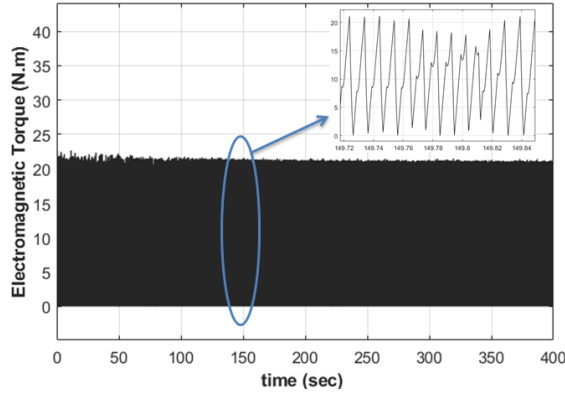
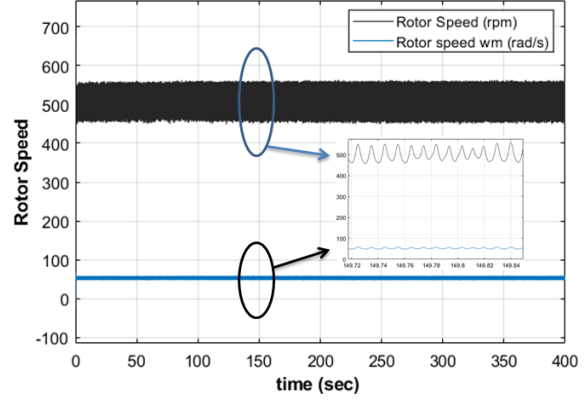


Figure 11. BLDC motor stator currents.

The change of electromagnetic torque depending on the UAV load is given in Figure 12. The rotor speed change graph of the BLDC motor is given in both rpm and rad/s in Figure 13. The rotor speed is desired to be kept at 500 rpm. It can be seen from the figure that it reaches 500 rpm in a short time as a result of the batteries being activated.



**Figure 12.** Electromagnetic torque change.



**Figure 13.** Rotor speed change.

According to these results, it is observed that in certain fault conditions, the BMS comes into play and meets the energy needs by ensuring the smooth operation of the system.

## 6. Conclusions

Li-ion batteries are used to meet the electrical energy needs of UAVs. During charging/discharging of Li-ion batteries, chemical reactions occur within the cells. While these reactions are taking place, optimum operating conditions must be provided by controlling the current, voltage and temperature values that affect the reaction speed. If the optimum operating conditions are exceeded, problems will occur because the reactions cannot occur as they should. Thus, it will prevent the battery group from working. BMSs are used to control problems that may occur in the battery. BMSs, which ensure the safe operation of batteries, receive high charge/discharge current, high/low output voltage, high/low temperature values from the battery through sensors. In case of possible problems, these problems will be prevented by taking the battery under control. In addition, BMSs provide us with information about battery life by estimating the current state of the battery with the information obtained from sensors.

In this study, a BMS system is modeled in order to disable the battery in case of any problem in a Li-ion battery containing four cells and use it more efficiently. Thanks to the capacitor block in the BMS module, the energy needs of the UAV are met even if the damaged cell is disabled. Thus, wide range of changes in the output current and voltage of the UAV system are prevented. In this way, the health of the battery cells is ensured. Thus, the efficiency of the system is increased by allowing it to be used for a longer period of time.

## Acknowledgements

This study has been produced from Merve Nur KAYA's master's thesis.

## References

- [1] Oksuztepe E, Bayrak Z, Kaya U. Effect of Flight Level to Maximum Power Utilization for PEMFC/Supercapacitor Hybrid UAV with Switched Reluctance Motor Thruster. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48: 11003-11016.
- [2] Oksuztepe E, Kaya U. Performance Analysis of More Electric Aircraft Starter/Generator by Different Electric Loads. *Int J Sustainable Aviat.* 2023; 9(2).
- [3] Tarhan B, Yetik Ö, Karakoç H.T. Hybrid Battery Management System Design for Electric Aircraft. *Energy* 2021; 234: 121227.
- [4] Lapeña-Rey N, Mosquera J, Bataller E, Ortíz F, Dudfield C, Orsillo A. Environmentally Friendly Power Sources for Aerospace Applications. *J Power Sources* 2008;181: 353–362.
- [5] Özel MA. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Paketinin Termal Modeli ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.



- [6] Üçgün H, Yüzgeç, U Bayılmış, C. İHA Bataryasının Şarj Pedi ile Dengeli Şarj Edilmesi ve Gerçek Zamanlı İzleme Sistemi. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 2021; 8(1): 398-407.
- [7] Wang L, Zhao X, Deng Z, Yang L. Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy in Battery Management System: State of Charge Estimation for Aging Batteries. J Energy Storage 2023; 57: 106275.
- [8] Yıldız M. Battery Management System Architectures for Unmanned Air Vehicles: A Strategic Issue J Anadolu Strategy 2021; 3(1): 1-12.
- [9] Shibl M, Ismail L, Massoud A. A Machine Learning-Based Battery Management System for State-Of-Charge Prediction and State-of-Health Estimation for Unmanned Aerial Vehicles J Energy Storage 2023; 66: 107380.
- [10] Dündar Ö, Bilici M, Ünler T. Design and performance analyses of a fixed wing battery VTOL UAV. Eng Sci Technol. Int J 2020;23:1182-1193.
- [11] Tian W, Liu L, Zhang X, Shao J, Ge J. Adaptive Hierarchical Energy Management Strategy for Fuel Cell/Battery Hybrid Electric UAVs Aerosp Sci Technol. 2023;108938.
- [12] Yıldız M. Uçaklarda Kullanıma Yönelik Batarya Isıl Yönetim Sistemlerinin Araştırılması. Doktora Tezi Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [13] Li H, Kaleem B, Chiu I, Gao D, Peng J, Huang Z. An Intelligent Digital Twin Model for The Battery Management Systems of Electric Vehicles. Int J Green Energy 2024; 21(3): 461-475.
- [14] Khawaja Y, Shankar N, Qiçieh I, Alzubi J, Alzubi O, Nallakaruppan MK, Padmanaban S. Battery Management Solutions for Li-ion Batteries Based on Artificial Intelligence. Ain Shams Eng J 2023; 14: 102213.
- [15] Son YW, Kang D, Kim J. Passive Battery Thermal Management System for An Unmanned Aerial Vehicle Using A Tetrahedral Lattice Porous Plate. Appl Therm Eng 2023; 225: 120186.
- [16] Yıldız M, Karakoç HT. Havacılıkta Kullanılan Bataryaların Tasarım Parametrelerine Göre Boyutlandırılması. Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi 2017; 2(1): 26-34.
- [17] Sezer KC, Basmacı G. Şarj Edilebilir Pillere Genel Bakış. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2022; 10(1): 227-309.
- [18] Kaya MN, Bayrak ZU. States Based EMS for Li-ion Battery & Fuel Cell Powered Unmanned Aerial Vehicle. 7th Int Hydrogen Technologies Congress; 10-12 May 2023; Elazığ, Türkiye. pp. 475-478.
- [19] Kaya MN, Bayrak ZU. Detailed Analysis of Li-ion Batteries for Use in Unmanned Aerial Vehicles. Turkish Journal of Science & Technology 2024; 19(1): 295-304.
- [20] Ekici YE, Batarya Yönetim Sistemleri. Yüksek Lisans Tezi İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [21] Erdiñç O, Vural B, Uzunoğlu M. Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu; 5-7 Ekim 2011; Elazığ, Türkiye. pp. 116-121.
- [22] Çetin MS, Karakaya B, Gençoğlu MT. Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi 2021; 33(2): 755-763.
- [23] Taylan G. Lityum İyon Pil Hücresinin Termal Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [24] Okay K, Eray S, Eray A. Development of Prototype Battery Management System for PV System. Renewable Energy 2022; 181: 1294-1304.
- [25] Kim W, Choi K. Current Sensorless State of Charge Estimation Approach for Onboard Battery Systems with an Unknown Current Estimator. J. Energy Storage 2022; 52: 104726.
- [26] Yiğit E, Yazar I, Karakoç TH. İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın Kapsamlı Sınıflandırması ve Gelecek Perspektifi. Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi 2018; 3(1): 10-19.
- [27] Blažek J. Leakage Magnetic Fields of The Electric BLDC Motors of Small UAV J Electr Eng 2015; 66(7): 14-17.
- [28] Cukdar I, Yigit T, Celik H. Balance Control of Brushless Direct Current Motor Driven Two-Rotor UAV Appl Sci-Basel 2024; 14 (4059): 1-21.

## Serpantinli Topraklarda Yetişen *Teucrium polium*' un Bor Akümülayon Performansının İncelenmesi

Nevin KONAKCI\*

<sup>1</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> nevinozurk@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/02/2024;

Kabul/Accepted: 26/07/2024)

**Öz:** Guleman bölgesi, Türkiye' nin en önemli krom cevheri üreten bölgelerinden biri olup, geniş alanda serpantinli kayalar yüzeylemeler vermektedir. Bu çalışma Guleman serpantinli toprakları üzerinde yetişen *Teucrium polium* bitkisinin kök ve dalındaki bor akümülayonlarını incelemiştir. Çalışma alanında serpantinli topraklar üzerinde yetişen 17 adet *Teucrium polium* bitkisi toprağı, kök ve dalı ile birlikte toplanarak, bor için ayrı ayrı kimyasal analizleri yapılmıştır. Kimyasal analizler ICP-MS (İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi)'de gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak toprakta 7,94 ppm, kökte 14,8 ppm ve dalda ise 70,06 ppm bor değerleri saptanmıştır. Bu bitkinin toprak, kök ve dallarındaki bor zenginleşme değerleri (ECR, ECS ve TLF) oldukça yüksek çıkmıştır. Bu değerler de *Teucrium polium* bitkisinin topraktan hem köke, hem de dala önemli oranda bor akümülayonu gerçekleştirdiğini göstermiştir. Sonuç olarak bu bitki, özellikle bor ile kirlenmiş toprakların ıslah çalışmasında ve böyle alanların iyileştirilmesinde biyoakümülatör bitki olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bor, Guleman, serpantinli topraklar, akümülayon

### Investigation of Boron Accumulation Performance of *Teucrium polium* Grown in Serpentine Soils

**Abstract:** Guleman region is one of the most important chrome ore producing regions of Turkey, and serpentine rocks outcrop in a wide area. This study examined boron accumulation in the roots and shoots of the *Teucrium polium* plant growing on Guleman serpentine soil. The soil of 17 *Teucrium polium* plants growing on serpentine soils in the study area were collected together with their roots and shoots and chemical analyses were carried out separately for boron. Chemical analyses were carried out in ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry). On average, boron values were determined as 7.94 ppm in the soil, 14.8 ppm in the root and 70.06 ppm in the shoot. Boron enrichment values (ECR, ECS and TLF) in the soil, roots and shoots of this plant were quite high. These values showed that the *Teucrium polium* plant accumulated significant amounts of boron from the soil to both roots and shoots. As a result, it has been shown that this plant can be considered as a bioaccumulator plant, especially in the reclamation of boron-polluted soils and the improvement of such areas.

**Key words:** Boron, Guleman, serpentine soils, accumulation.

### 1. Giriş

Bor (B) metaloiddir (ametal değildir), oksijene karşı güçlü bir afiniteye sahip olup, yer kabuğunda ortalama 15 mg/g olarak gözlenmektedir [1]. Bor, dünya genelinde %76 oranında cam sektöründe, %7 oranında ise deterjan sektöründe kullanılmaktadır. Diğer kullanım alanları ise kimyasal gübreler, yangın geciktiriciler ve metal alaşımlarıdır [2]. Türkiye dünya bor rezervlerinin %70' inden fazlasına sahiptir [3-4]. Türkiye'de bor (B) içeren deterjanlar ve kimyasallar son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle yakın gelecekte nehirler, göller ve tarım alanları gibi ekosistemlerin çoğu, yoğun bor kirliliğine maruz kalacaktır. Bor ayrıca seramik, cam, tarım, metalurji ve gübre alanları gibi birçok endüstride de yaygın olarak kullanılmaktadır [5-6]. B, düşük seviyelerde gözlemlendiğinde bitkiler için temel bir element, insanlar ve hayvanlar için ise mikro besindir. 80' den fazla ülkede hem hayvanlarda, hem de bitkilerde büyümeyle ilgili bor eksiklikleri gözlemlenmiştir. Diğer iz elementlerde olduğu gibi bor da yüksek konsantrasyonda alındığında hem bitkiler hem de hayvanlar üzerinde toksik etki göstermektedir. B toksisitesi ve eksikliği arasındaki aralık diğer besin elementlerinden daha küçüktür. Kurak bölgelerin topraklarında doğal olarak yüksek B düzeyleri ve kömür madenciliği, tarım arazilerinin sulanması, tarım arazilerinde uçucu kül birikimi gibi insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkmaktadır [7]. Bitkilerde düşük maruziyetlerde bile B toksisitesi genellikle yaprak kenarlarında doku hasarı, fotosentetik kapasitenin azalması ve bitki büyümesinde önemli azalmalardan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle Türkiye, Kuzey Afrika, Amerika Birleşik Devletleri ve Avustralya gibi kurak ve yarı kurak ülkelerde yetişen bitkisel ve doğal bitkilerde B toksisiteleri gözlemlenmiştir [8].

\* Sorumlu yazar: [nevinozurk@firat.edu.tr](mailto:nevinozurk@firat.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: 1 0000-0002-0163-0966

Ağır metaller (HM) yüksek atom ağırlığına ve suyunkinden en az beş kat daha fazla yoğunluğa sahiptir [9]. Su ortamlarındaki HM kirliliği, bitki ve hayvan yaşamını etkileyen temel sorunlardan biridir [10]. HM'ler, Gergen ve Harmanescu [11] ve Rai vd. [12] tarafından iki kategoriye ayrılmıştır. Ni, Cd, Hg, Pb, Cr ve As gibi bu metallerin yaşam için gerekli olmadığı ve toksik etki sağladığı, buna karşılık Co gibi metallerin, Fe, Cu, Cr (+3), Mn, Zn bitki ve hayvan yaşamı için gereklidir. Ancak konsantrasyonları çok yüksek ise toksik hale gelebilir. HM toksisiteleri kimyasal türler, maruz kalma yolu, doz, beslenme durumu, cinsiyet ve genetik gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Arsenik, civa, krom, kurşun ve kadmiyum, yüksek derecede toksisiteleri nedeniyle halk sağlığı açısından önceliklidir [9]. Kapanmış endüstriyel ve madencilik faaliyetlerinde As, Pb, Hg, Cd, Cr, Ni, Fe, Cu, Co ve Zn gibi toksik ağır metaller yaygın su, hava ve toprak kirliliğine neden olmuştur [12].

Ağır metallerin giderilmesine yönelik farklı teknikler arasında fitoremediasyon, kirletici maddelerin su ve topraktan yerinde uzaklaştırılması için canlı yeşil bitkilerin kullanılması açısından uygun maliyetli ve çevre dostu olanlardan biridir [6, 13-15]. Fitoremediasyon iyon alım mekanizmasının yanı sıra, her türün fizyolojik, anatomik ve morfolojik özelliklerine de bağlıdır [16] ve kirlenmiş alanlardan ağır metallerin uzaklaştırılması için hiperakümülatör bitkilerin kullanıldığı bitkisel iyileştirme metodudur [17-18]. Dokularında kuru ağırlığı 1.000 mg/kg' dan fazla Ni, Co, Cu, Cr, Pb veya 10.000 mg/kg Zn veya Mn bulunan bitkiler hiperakümülatör bitki olarak tanımlanmaktadır. Bor için ise topraktaki bor konsantrasyonunun en az birkaç katı bünyesine bor alan bitkiler hiperakümülatör bitki olarak değerlendirilmektedir [17-19].

Ultramafik kayalar yüksek oranda Fe, Mg, Ni, Co ve Cr içeren ve bünyesinde %45' den daha az silika (SiO<sub>2</sub>) bulunduran kayalardır [20-23]. Ultramafik kayalar peridotit, dünit ve serpantinitten oluşmaktadır. Bu kayalardan türeyen ultramafik topraklarda, peridotit ve piroksenit gibi ferromagnezyen mineraller yaygın olarak bulunmaktadır [24]. Serpantinli topraklar Ni, Co, Cr, Mn ve Zn gibi ağır metaller bakımından zengin olup, bu metallerin bazı seviyeleri eser düzeyde bitki büyümesi için gerekli iken, yüksek seviyeleri hücre fonksiyonlara müdahale ederek toksisiteye neden olabilmektedir [25-27]. Serpantinli topraklar ve bu topraklarda yetişen farklı bitkilerin farklı elementleri akümülyasyonları üzerine pek çok çalışma yapılmıştır [25, 28-35]. Ancak Guleman yöresinde doğal olarak yetişen, yaygın ve dominant türlerden birisi olan *Teucrium polium*' un bor akümülyasyonları üzerine herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, Guleman serpantinli topraklar üzerinde baskın tür olarak yetişen *Teucrium polium*' un toprak, kök ve dallarındaki bor akümülyasyon oranlarını incelemektir. (1)

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Çalışma alanı

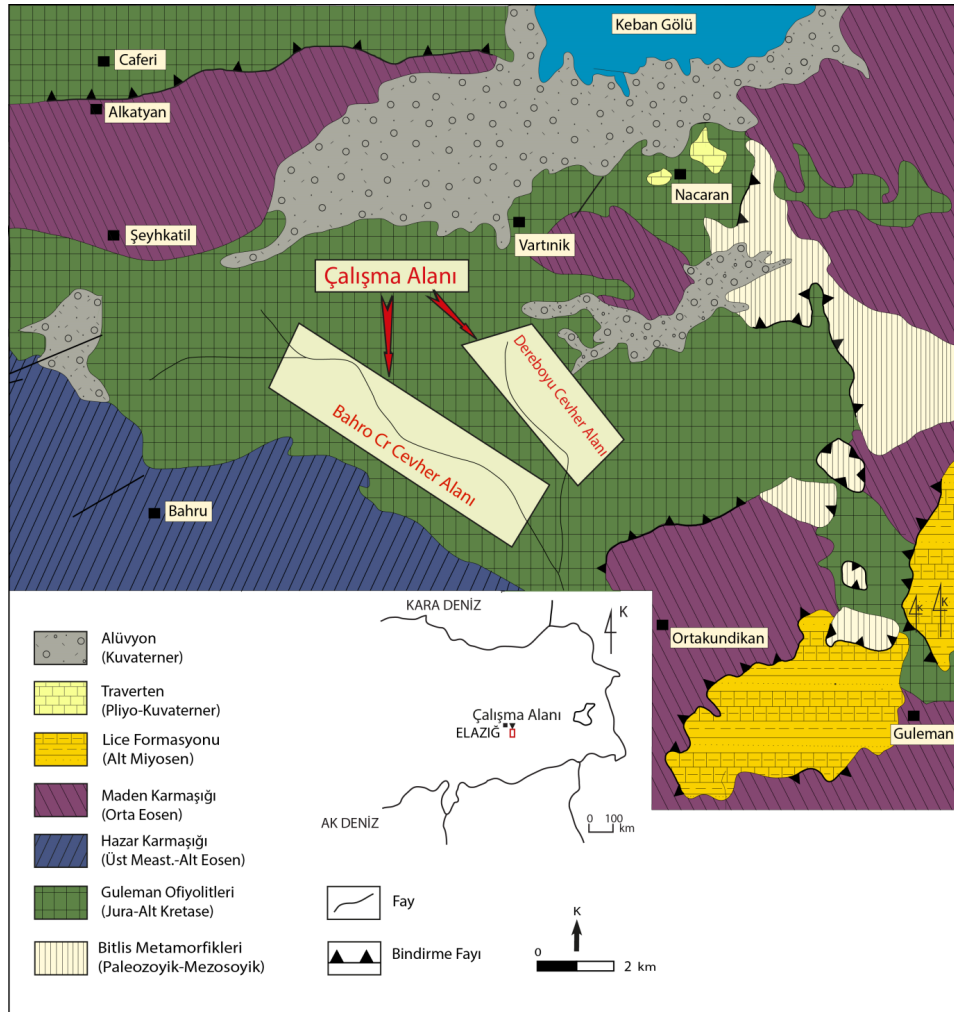
Bu araştırma, Türkiye Elazığ' da, 1936 yılından bu yana madencilik faaliyetlerinin uygulandığı Guleman maden sahasının Kef bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Türkiye'nin en önemli krom cevheri üreten bölgelerinden biri olan Guleman bölgesi, yatakların niteliğine, litolojik özelliklerine, coğrafik ve yapısal konumuna göre çeşitli madencilik sektörlerine ayrılmaktadır. Guleman çevresinde gözlenen krom yatakları, bölgede geniş alanda yüzeyleme veren dünit, peridotit ve piroksenitler ile ilişkilidir [36]. Bu kayalar ayrıca bol miktarda Cr, Ni ve Co içermektedir. Çalışma alanında açık ocak işletmeleri veya galeriler kullanılarak krom cevheri çıkarılmaktadır. Bölgede başlangıçta mostra madenciliği ve açık işletme yöntemleriyle nispeten kolaylıkla yapılan madencilik çalışmaları, bu yöntemlerle alınabilecek cevherin azalması sonucu, 1950 yılında yeraltı madenciliği başlamıştır. Günümüzde yörede kapalı işletme ve açık işletme yöntemleri ile devam edilmektedir [36]. Guleman bölgesinde birçok kayaç topluluğu bulunmaktadır. Bunlar yaşlıdan gence doğru, Paleozoyik yaşlı Bitlis Metamorfileri, Üst Kretase yaşlı Guleman Ofiyoliti, Üst Meastrihtiyen-Orta Eosen yaşlı Hazar Grubu, Orta Eosen yaşlı Maden Karmaşığı ve Miyosen yaşlı Lice Formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 1).

### 2.2. Toprak ve Bitki Örnekleri

*Teucrium polium* bitkisi ve toprağı çalışma alanında 17 farklı lokasyondan toplanmıştır. Halk dilinde peryavşan olarak bilinen *Teucrium polium*, insanlar tarafından tıbbi amaçlı olarak kullanılmaktadır. *Lamiaceae* familyasının *Teucrium* cinsinin 300 türünden biridir [37-38]. *Teucrium polium*; 20-50 cm yüksekliğinde, sapsız, dikdörtgen ya da doğrusal yaprakları olan bir çalıdır ve hemen hemen tüm Akdeniz ülkelerinin, Güney Batı Asya, Avrupa ve Kuzey tepelerinin ve çöllерinin taşlık yerlerinde yetişmektedir ve en çok İran' da bulunmaktadır [38-40]. *Teucrium polium*, beyazımsı renkte çiçeklere sahip, 40 cm' ye kadar boyolanabilen yarı-çalımsı çok yıllık otsu bir bitkidir. Çalışma alanındaki topraklarda dominant bir tür olarak yaygın olarak bölgede yetişen bu bitki, cevherli/cevhersiz alanlarda bitki kökü, dalı ve üzerinde yetiştiği topraklardan ayrı ayrı örnekleme yapılmıştır. Toprak örnekleri *Teucrium polium*' un kök besleme yerlerinden 0,10 ile 0,40 m derinliklerden alınmıştır. Serpantinli topraklardan alınan *Teucrium polium* bitkisi, kök ve dallarına ayrılarak, önce musluk suyu ile daha sonra saf su ile yıkanmış,

24 saat 60 °C'de kurutulan bitki örnekleri etüvde 300 °C'de 24 saat süre ile alevsiz ortamda yakılarak kül haline getirilmiştir [6].

Laboratuvarda 0,10 gr kül ve toprak örneklerine 2 ml derişik HNO<sub>3</sub> ilave edilerek 1 saat süreyle 95 °C'de ısıtıcı üzerinde ısıtılarak kurutulmuştur. Kurutulan örneklere 2 ml HNO<sub>3</sub> ve HCl-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O (her bir kimyasaldan 1:1:1 alınarak hazırlanan 6 ml karışım ve 0,10 gr kül ve toprak örneği) karışımı ilave edilmiştir. Tüm toprak örnekleri karışım içerisinde çözüldükten sonra B element analizleri, ICP-MS (İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi)' de gerçekleştirilmiştir. Yine aynı şekilde topraklarda olduğu gibi, bitki kül örneklerinde de B analizleri ICP-MS ile yapılmıştır. Bu çalışmada bitki ve topraktaki B analizleri için ICP-MS (Perkin-Elmer ELAN 9000) teknolojisi kullanılmıştır. Tüm analizler Kanada ACME analiz laboratuvarında yapılmıştır. ECR değerleri bitki kökünün toprağına bölümü; ECS değerleri bitki dalının toprağına bölümü, TLF değerleri ise bitki dalının bitki köküne bölümü olarak hesaplanmıştır.

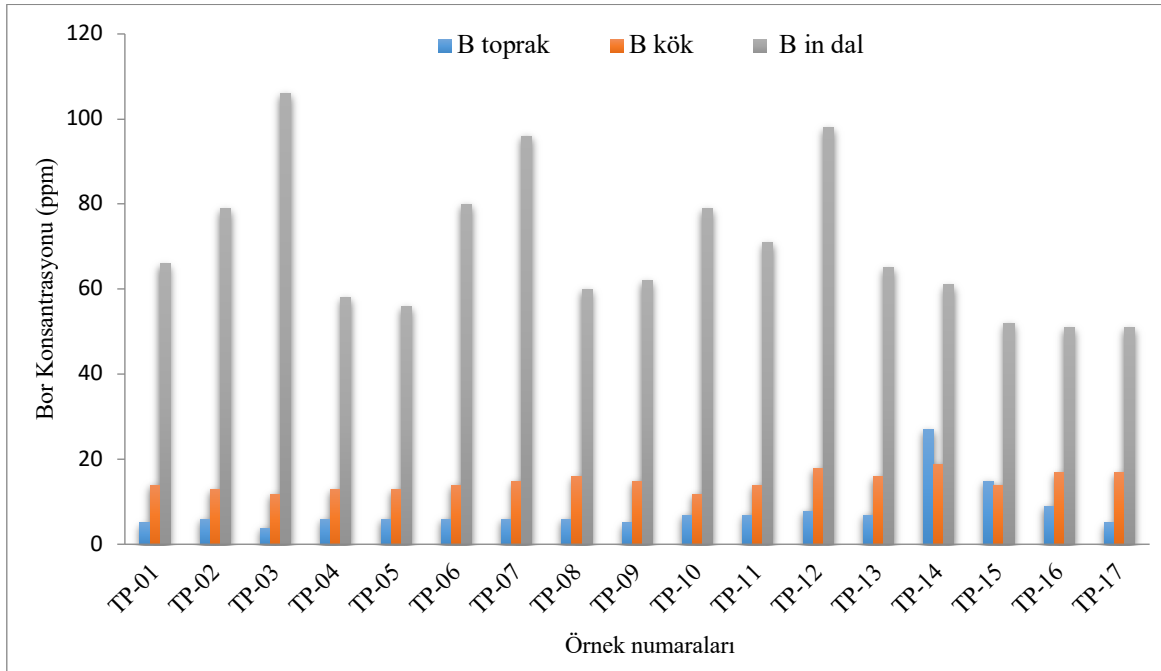


Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji haritası [41].

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Toprak'ta Bor

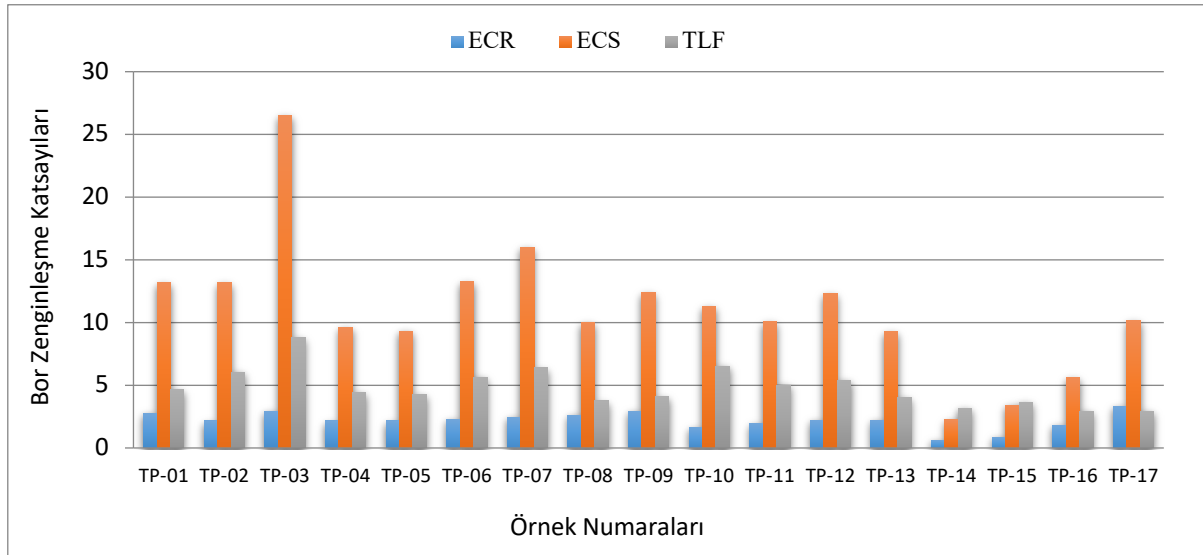
Serpantinli toprakların pH' ı 7,6-7,8; organik madde içeriği ise %8-12' dir. Ortalama %35 kum, %27 kil ve %23 siltten oluşan tınlı ve turbalı kilden oluşmakta olup, renkleri tipik olarak koyu kahverengiden açık griye kadar değişmektedir. Diğer maden topraklarıyla karşılaştırıldığında, özellikle serpantinli topraklarda daha az miktarda organik madde bulunduğu gözlenmiştir. İncelenen toprakların ortalama B içeriği 14,6 ppm olup, en yüksek 27 ppm, en düşük ise 4 ppm bor konsantrasyonları gözlenmiştir (Şekil 2). Benzer şekilde, Keban maden topraklarında ortalama B değerleri 16,9 ppm ve 7,94 ppm arasında bulunmuştur. Bu bulgular, Guleman kromit yataklarının yakınındaki serpantinli topraklarda B içeriğinin düşük olmasının nedeninin, böyle yerlerde yüzeylenen yan kayalar ile ilgili olabileceğini düşündürmektedir. Çalışılmış toprak örneklerinin kimyasal analizi sonucunda diğer elementlerle belirgin bir pozitif korelasyon göstermemiştir, Bor, çok sayıda element arasında sadece Mg (0,76) ile pozitif korelasyon gösterirken, Cu (0,51), Zn (0,56), Ca (0,63) ve Se (0,47) ile de negatif korelasyonlar sunmaktadır. Şaşmaz [42] tarafından Keban maden sahasındaki yüzey topraklarında 26 toprak örneğinde B konsantrasyonu, 1,0 ile 16 ppm (ortalama: 4,97 ppm) arasında değişmektedir. Kabata-Pendias' a [1] göre, en yüksek toprak konsantrasyonları 10 ile 100 ppm kireçli topraklarda, 120 ile 130 ppm killi topraklarda gözlenmiştir. Mafik ve podzollü topraklar en düşük bor miktarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Sıcak, nemli veya kuru ve yarı kurak ortamlardaki topraklarda B, öncelikle yüzey katmanlarında yoğunlaşır; bununla birlikte, oksitler veya illit gibi killi ve nemli topraklarda, B tipik olarak su akışı yani topografik eğim boyunca aşağıya doğru hareket etmektedir. Craw vd. [43]' ne göre topraktaki B kirliliğinin en sık nedenlerinden ikisinin uçucu kül ve kanalizasyon çamuru olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde, B ile kirlenmiş yüzey suları ve kömür madenlerinden salınan sular, sulama amacıyla kullanıldığında toprakta tarıma zarar vermektedir. Lucho-Constantino vd. [44]' ne göre sulama süresi ve insanlardan kaynaklanan kirlilik nedeniyle topraktaki B seviyesi, 124 ppm' e kadar yükselebilmektedir. Yüksek B içeren toprakları rehabilitasyon veya restorasyon işlemi oldukça zordur, ancak hafif asitli topraklardaki yüksek B düzeyi, yoğun sulama işlemleri ile kolayca ıslah edilebilmektedir.



Şekil 2. Serpantinli topraklarda yetişen *Teucrium polium* bitkisinin toprak, kök ve dalındaki bor akümülyasyon dağılımı.

### 3.2. *Teucrium polium*' da Bor

Guleman çevresindeki serpantinli toprakların yaygın olarak gözlemlendiği alanlardan, 17 adet farklı lokasyonlardan *Teucrium polium* bitkisi toplanarak kök ve dal şeklinde bölümlere ayrılıp, bor için kimyasal analizleri yapılmıştır. Kök için yapılan kimyasal analizlerde en yüksek 19 ppm bor içeriğine sahip iken, en düşük ise 12 ppm olarak saptanmıştır. Kökteki ortalama bor konsantrasyonu ise 14,8 ppm olarak belirlenmiştir (Şekil 2). *Teucrium polium*'un dallarında ise ortalama bor konsantrasyonu 70,06 ppm olarak gözlenirken, en yüksek 106 ppm, en düşük ise 51 ppm olarak gözlenmiştir (Şekil 2). *Teucrium polium*' un topraktan aldığı bor değerlerinin kök ve daldaki zenginleşme değerlerini ortaya koymak için; kök ve toprak arasındaki zenginleşme katsayısını ortaya çıkarmak için ECR, dal ile toprak arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için ECS, kökten dala olan bor akümülyasyonlarını belirlemek için ise TLF değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre *Teucrium polium*'un bor için ortalama ECR değerleri 2,23 olarak bulunurken, ECS için 11,07, TLF için ise 4,85 olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu değerler de çalışılan bitkide kök ve dalın topraktan yüksek oranda bor akümüle etme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Kök ve dalın bor akümülyasyon oranlarını karşılaştırdığımızda, dalın köke oranla çok daha fazla akümülyasyon yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir, bu da TLF değerlerinin yüksek olması, bitki kökünden, bitki dalına bor transferinin hızla yapıldığını işaret etmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Serpantinli topraklarda yetişen *Teucrium polium* bitkisinin ECR, ECS ve TLF zenginleşme değerleri.

Kabata-Pendias [1], çözünebilir B formlarının bitkilerde kolaylıkla alınarak biriktiğini bildirmiştir. Pasif absorpsiyon sırasında borik asit, polisakkaritlerle birlikte kompleks oluşturmada önemli bir role sahiptir. Pasif veya aktif B alım sürecinin nasıl çalıştığı konusunda hala tartışmalar devam etmektedir. Bowen [45], arpa kökleri tarafından altı B emilim fazı bulunmuştur. Metabolik kontrol nispeten düşüktür; B emilimi esas olarak köklerden su akışıyla başlar. Bu nedenle B birikimi su akışı ve B konsantrasyonu ile orantılıdır. Jin vd. [46], mısır dokularındaki B değerlerinin, kolaylıkla çözünebilir dört B bileşiği ile pozitif ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu dört B bileşiği, topraktaki toplam B' nin %0,4 ile %2,0' ı arasında değişmektedir. Szabo [47], bitkilerdeki B birikiminin besin içeriğiyle birlikte arttığını ve bunun da fizyolojik ihtiyaçlardan daha fazla olduğunu belirtmiştir. Kot [48], B fitoyararlılığı hakkında yayınlanmış verilere dayanarak, B alımının temel olarak borik asit tarafından emilen membran geçirgenliğindeki değişime bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, B emilimi öncelikle bitkilerin terleme hızı ve besin çözeltisindeki B içeriğine bağlıdır. Daha yüksek bitkilerde B alımı çoğunlukla terleme oranlarına ve dış borik asit konsantrasyonuna bağlı pasif bir işlemdir. Ancak bu durum iç kompleks oluşumunun ve membran geçirgenliğinin kontrolüyle ilgilidir [1]. Son zamanlarda B' nin yaygın bir çevre kirleticisi olduğu belirtilmiş ve bu nedenle B ile kirlenmiş alanların bitki yönetimi araştırılmıştır. Robinson vd. [49]' ne göre, *Populus* sp., yaklaşık 30 ppm B içeren katmanda büyümüş ve 845 ppm' e kadar B' yi yaprağında biriktirmiştir. Buna karşılık, kökleri maksimum 21 ppm B biriktirebilmiştir. Marin ve Oron [50], su mercimeğinin kirlenmiş sulardan B' yi uzaklaştırma konusunda mükemmel bir yeteneğe (1900 ppm'e kadar) sahip olduğunu belirtmiştir. Zhao vd. [51], kültür sistemleri içerisinde *Puccinellia tenuiflora*, *Iris wilsonii*, *Suaeda glauca* ve *Tripolium pannonicum* bitkilerinin B birikim performansını ve toleransını test etmiş ve fitoremediasyon çalışmaları için

performanslarını karşılaştırmıştır. *T. pannonicum*, *S. glauca*, *I. wilsonii* ve *P. tenuiflora* için en yüksek B değerleri sırasıyla 40, 250, 700 ve 300 ppm olarak bulunmuştur. Tespit edilen en yüksek B düzeyleri dalda sırasıyla 450, 2480, 15210 ve 8030 ppm, köklerde ise sırasıyla 230, 700, 6690 ve 2630 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler *S. glauca*, *I. wilsonii* ve *P. tenuiflora*'nın B için yüksek birikim kabiliyetine sahip olduğunu ve *I. Wilsonii*' nin B ile kirlenmiş alanların fitoremediasyonu için en umut verici aday olduğunu göstermiştir. Rees vd. [7], kavakların yüksek B konsantrasyonu biriktirmesi nedeniyle kavakların B ile kirlenmiş toprakların bitki yönetiminde faydalı olduğunu belirtmiştir. *Salix viminalis*, *Brassica juncea* ve *Lupinus albus*, karşılaştırma amacıyla çeşitli koşullar altında büyütülmüştür. Topraktaki B konsantrasyonu 93 ppm' e kadar kavakların gelişmesini etkilememiştir. 168 ve 280 ppm konsantrasyonlarda büyüme kademeli olarak azalmıştır. Kavak yaprağındaki <900 ppm B konsantrasyonları, yalnızca <10' da toksisite belirtileri göstermiştir. Ortalama B düzeylerinin yapraklarda 3500 ppm' e kadar çıktığı, yapraklardaki lekelerin ise 7000 ppm' in üzerinde olduğu tespit edilmiştir ve bu durum yapraktaki B içeriğinin nekroz başlangıcından sonra da devam ettiğini göstermektedir. Bu veriler, diğer ağır metallerin fitoremediasyonu için tavsiye edildiği gibi, B ile kirlenmiş toprağın bitki yönetimi açısından kavakların *B. juncea* ve *S. Viminalis*' ten daha iyi olduğunu göstermiştir. Sasmaz [42], Keban Bölgesi Pb-Zn-Cu-F maden sahası topraklarında yetişen *Euphorbia macroclada*, *Verbascum cheiranthifolium* ve *Astragalus gummifer* bitkilerinin hem toprağı ve kökü, hem de dallarındaki bor konsantrasyonlarını araştırmıştır. Bitkiler ve bunlarla ilişkili toprak örnekleri İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile analiz edilerek, dünyadaki diğer topraklardaki bor içerikleri (ortalama 4,97 ppm) ile karşılaştırılmıştır. Bitki organlarının bor konsantrasyonları, ilgili topraklardakilerden birkaç kat daha yüksek olduğu saptanmıştır. *E. macroclada*, *V. cheiranthifolium* ve *A. gummifer*' in köklerindeki B konsantrasyonlarının ortalama değerleri sırasıyla 25, 70 ve 69 ppm, dallarında ise 75, 115 ve 77 ppm olarak bulunmuştur. Sonuçlar, düşük B konsantrasyonuna sahip topraklarda yetişen bitkilerin köklerinin ve dallarının, hem çevresel kirlenme için biyomonitör, hem de B için biyojeokimyasal indikatör bitki olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Sasmaz vd. [52], Elazığ bölgesinde, hem madencilik, hem de belediye atık su deşarjlarındaki sucul makrofitlerle toprak ve sudaki B birikimini araştırmışlardır. Bu amaçla, maden ve belediye atık su deşarj sahalarındaki derelerden toprak, bitki ve su örnekleri toplanmış ve ICP-MS kullanılarak B analizi yapılmıştır. Çalışmaların sonucunda, *Xanthium strumarium* (toprak 15,0 ppm; kök 30,0 ppm; dal 125,0 ppm), *Eupatorium cannabinum* (toprak 13,0 ppm; kök 16,5 ppm; dal 29,5 ppm), *Lythrum salicaria* (toprak 19,7 ppm; kök 27,0 ppm; dal 42,7 ppm), *Tamarix tetrandra* (toprak 17,3 ppm; kök 16,8 ppm; dal 38,0 ppm), *Typha latifolia* (toprak 17,0 ppm; kök 17,0 ppm; dal 37,0 ppm) ve *Salix* sp. (toprak 15,0 ppm; kök 20,8 ppm; dal 30,5 ppm) bitkilerini bor için hiperakümülatör olduğunu belirlemişlerdir. Bu hiperakümülatör bitkiler, B' yi topraktan ve sudan bitki parçalarına biriktirme ve taşıma konusunda büyük bir kapasiteye sahip olduğunu, dolayısıyla da bu bitkilerin B ile kirlenmiş toprak ve suların dekontaminasyonu veya rehabilitasyonu için faydalı olabileceğini ortaya koymuşlardır.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Elazığ Guleman Bölgesi'ndeki serpantinli topraklar üzerinde yetişen *Teucrium polium* bitkisinin, kök ve dalındaki bor alım akümülyasyonları incelenmiştir. Bu kapsamda toprakta ortalama 7,94 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda gözlenen bor, *Teucrium polium*' un kökünde 14,8 ppm, dalında ise 70,06 ppm ortalama bor konsantrasyonları belirlenmiştir. Dolayısıyla çalışılan bitkinin, topraktan yüksek oranda hem kök kısmına hem de dal kısmına önemli oranda boru akümüle ettiği saptanmıştır. Sonuç olarak *Teucrium polium* bitkisi, bor ile kirlenmiş sahaların rehabilitasyon çalışmalarında yüksek ECR ve ECS değerlerine sahip olmaları nedeniyle kolaylıkla kullanılması önerilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından FUBAP-MF.20.16 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP çalışanlarına teşekkür ederim.

#### Kaynaklar

- [1] Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton 2011.
- [2] US Environmental Protection Agency (USEPA). Framework for human health risk assessment to inform decision making, 2014; EPA/100/R-14/001, Risk Assessment Forum, Office of the Science Advisor, USEPA, Washington, DC. <http://www.epa.gov/risk/framework-human-health-risk-assessment-inform-decision-making>.
- [3] Helvacı C. Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadic Borate deposits, Western Turkey. Economic Geology 1995; 90,1237–1260.

- [4] Helvacı C, Alonso RC. Borate deposits of Turkey and Argentina; a summary and geological comparison. *Turkish Journal of Earth Sciences* 2000; 9, 1–27.
- [5] Yermiyahu U, Keren R, Chen Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 1995; 59:405–409.
- [6] Tatar SY, Obek E. Potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minör* L. for accumulation of boron from secondary effluents. *Ecol Eng* 2014; 70:332–336.
- [7] Rees R, Robinson BH, Menon M, Lehmann E, Gunthardt-Goerg MS, Schulin R. Boron accumulation and toxicity in hybrid poplar (*Populus nigra xeuramericana*). *Environ Sci Technol* 2011; 45:10538–10543.
- [8] Turker OC, Vymazal J, Ture C. Constructed wetlands for boron removal: a review. *Ecol Eng* 2014; 64:350–359.
- [9] Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* 2012; 101, 133-164.
- [10] Duffus JH. "Heavy metals" a meaningless term (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 2002; 74(5), 793-807.
- [11] Gergen I, Harmanescu M. Application of Principal Component Analysis in the Pollution Assessment with Heavy Metals of Vegetable Food Chain in the Old mining Areas. *Chem Cent J* 2012; 6, 56.
- [12] Rai S, Gupta S, Mittal PC. Dietary Intakes and Health Risk of Toxic and Essential Heavy Metals through the Food Chain in Agricultural, Industrial, and Coal Mining Areas of Northern India. *Hum Ecol Risk Assess.* 2015; 21, 913–933.
- [13] Sood A, Uniyal PL, Prasanna R, Ahluwalia AS. Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, *Azolla*. *Ambio* 2012; 41, 122-137.
- [14] Goswami C, Majumder A, Misra AK, Bandyopadhyay K. Arsenic uptake by *Lemna minor* in hydroponic system. *Int J Phytorem* 2014.; 16, 1221-1227.10.
- [15] Sasmaz M, Arslan Topal EI, Obek E, Sasmaz A. The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *J Environ Manag* 2015; 163:246–253.
- [16] Rahman MA, Hasegawa H. Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere* 2011; 83, 633-646.
- [17] Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1989; 1:81–126.
- [18] Terzi H, Yıldız M. Bitkilerde ağır metal toksisitesi: proteomik yaklaşım. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2013; 13 (021001): 1-21.
- [19] Bani A, Echevarria G, Sulçe S, Morel JL, Mullai A. In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania). *Plant Soil* 2007; 293:79–89.
- [20] Alexander EB. Soil and vegetation differences from peridotite to serpentinite. *Northeast Nat.* 2009; 16, 178-192.
- [21] Alfaro MR, Montero A, Ugarte OM, Nascimento CWA, Accioly AMA, Biondi CM, Silva YJAB. Background concentrations and reference values for heavy metals in soils of Cuba. *Environ Monit Assess.* 2015; 187:4198.
- [22] Galey ML, Van der Ent A, Iqbal MCM, Rajakaruna N. Ultramafic geoecology of South and Southeast Asia. *Bot Stud* 2017;58:18.
- [23] Nascimento CWA, Lima LHV, Silva JAB, Biondi CM. Ultramafic soils and nickelphytomining opportunities: A review. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 2022; 46, 1-17.
- [24] Ghafoori M, Shariati M, Van der Ent A, Baker AJM. Nickel hyperaccumulation, elemental profiles and agromining potential of three species of *Odontarrhena* from the ultramafics of Western Iran. *International journal of phytoremediation* 2023; 25 (3),381-392.
- [25] Proctor J, Woodell SRJ. The ecology of serpentine soils. *Advances in Ecological Research* 1975; 9: 255–366.
- [26] Proctor, J. Vegetation and soil and plant chemistry on ultramafic rocks in the tropical Far East, *Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics* 2003; 6, (1–2), 105–124.
- [27] Tomovic GM, Mihailovic ML, Tumi AF, Gajic BA, Misljenovic TD, Niketic MS. Trace metals in soils and several *Brassicaceae* plant species from serpentine sites of Serbia. *Arch Environ Protec.* 2013; 39, 29- 49.
- [28] Jaffré T. Étude écologique du peuplement végétal des sol dérivés de roches ultrabasiqes en Nouvelle Calédonie. *Travaux et Documents de 1980; L'ORSTOM 124 Paris: ORSTOM.*
- [29] Rajakaruna N, Boyd RS. Serpentine Soils. In: *Oxford Bibliographies in Ecology* 2014; Ed. David Gibson. New York: Oxford University Press.
- [30] Avcı M. Diversity and endemism in Turkey's vegetation. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi* 2005; 13: 27-55.
- [31] Reeves RD, Baker AJM, Borhidi A, Berzain R. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany* 1999; 83(1), 29-38.
- [32] Rajakaruna N. The edaphic factor in the origin of plant species. *International Geology Review* 2004; 46: 471–478.
- [33] Kurt L, Ozbey BG, Kurt F, Ozdeniz E Bolukbaşı A. Serpentine Flora of Turkey. *Biological Diversity and Conservation* 2013; 6(1): 134- 152.
- [34] Gavrilescu, M. Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Current Opinion in Biotechnology* 2022; 74,(21), 31.
- [35] Konakçı N, Sasmaz Kislioglu M, Sasmaz A. Ni, Cr and Co Phytoremediations by *Alyssum murale* Grown in the Serpentine Soils Around Guleman Cr Deposits, Elazığ Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 2023; 110:97.



- [36] Engin T, Balcı M, Simer Y, Ozkan YZ. General geological setting and the structural features of the Guleman peridotite unit and the chromite deposits. Bull Min Res Exp Ins Turkey 1983; 95, 34-56.
- [37] Oualidi J, Verneau O, Puech S, Dubuisson JY. Utility of rDNA ITS sequences in the systematics of *Teucrium* section *polium* (*lamiaceae*). Plant Syst Evol 1999; 215: 49–70.
- [38] Kırkık D, Sancak NP, Alragabi JM. Türkiye’de yetişen *Teucrium polium* L. bitkisinin HepG2 hücre hattı üzerindeki etkisi. J Med Palliat Care 2020; 1(3): 49-52.
- [39] Feinbrun-Dothan N. Flora Palaestina, Part three. Israel Acad Sci Hum 1970; 3: 101–6.
- [40] Tapeh NG, Bernousi I, Moghadam AF, Mandoulakani, BA. Genetic diversity and structure of Iranian *Teucrium* (*Teucrium polium* L.) populations assessed by ISSR markers. J Agr Sci Tech 2018; 20: 333-45.
- [41] Özkan YZ. Guleman (Elazığ) ofiyolitinin yapısal incelenmesi, MTA Dergisi 1983 a; 37,78-85.
- [42] Sasmaz A. Translocation and accumulation of boron in roots and shoots of plants grown in soils of low B concentration in Turkey’s Keban Pb–Zn mining area. Int J Phytoremed 2008; 10:302–310.
- [43] Craw D, Rufaut CG, Haffert L, Todd A. Mobilization and attenuation of boron during coal mine rehabilitation. Wangaloa New Zealand. Sci Total Environ 2006; 368:444–455.
- [44] Lucho-Constantino CA, Prieto-Garcia F, Del Razo LM. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. Agric Ecosyst Environ 2005; 108:57–71.
- [45] Bowen HJM. Environmental chemistry of the elements. Academic Press 1979; New York.
- [46] Jin J, Martens DC, Zelazny LW. Distribution and plant availability of soil boron fractions. Soil Sci Soc Am J 1987; 51:1228.
- [47] Szabo AS. Non-destructive boron determination by activation analysis, the role of boron in the trophic chain. In: Pais I (ed) Proceedings of international symposium on new results in the research of hardly known trace elements and their role in food chains. University of Horticulture and Food Industry 1988, Budapest.
- [48] Kot FS. Boron sources, speciation and its potential impact on health. Rev Environ Sci Biotechnol 2009; 8:3–28.
- [49] Robinson BH, Green SR, Chancerel B, Mills TM, Clothier BE. Poplar for phytoremanagement of boron contaminated sites. Environ Pollut 2007; 150:225–233.
- [50] Marin CMD, Oron G. Boron removal by duckweed *Lemna gibba*: a potential method for the remediation of boron-polluted waters. Water Res 2007; 41:4579–4584.
- [51] Zhao Q, Li J, Dai Z, Ma C, Sun H, Liu C. Boron tolerance and accumulation potential of four salt-tolerant plant species. Sci Rep 2019; 9:6260.
- [52] Sasmaz M, Uslu Senel G, Obek E. Boron Bioaccumulation by the Dominant Macrophytes Grown in Various Discharge Water Environments. Bull Environ Contam Toxicol 2021; 106(6), 1050-1058.

## Taguchi DeneY Tasarımı ile Fiber Optik Kablo Üretimi Proses Optimizasyonu

İlker KARADAĞ<sup>1\*</sup>, Sinan DÜNDAR<sup>2</sup>, Ömer Faruk GÜRCAN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

\*<sup>1</sup> ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr, <sup>2</sup> sinandundar@cumhuriyet.edu.tr, <sup>3</sup> ofgurcan@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 12/02/2024;

Kabul/Accepted: 07/08/2024)

**Öz:** İnternetin, Dünya’da iletişim ve bilgiye anında erişimde insanlık tarihinin en önemli keşfi olduğu yadsınamaz bir gerçekliktir. Günümüzde internetin tüm Dünya’da yaygın bir teknoloji olmasında kullanılan araç, fiber optik kablolardır. Fiber optik kabloların bu bakımdan önemi, üretiminin nasıl gerçekleştirilmekte olduğu merakını doğurmaktadır. Fiber optik kablo üretiminde, özellikle fiberlerin zayıflama değerleri kablunun optik özellikleri açısından önemli bir faktördür. Zayıflama değerleri belirli bir değerin üzerinde olan kablolar atıl ürün olarak üretimden ayrılmaktadır. Bu durum işletme verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışma, Türkiye’nin en önemli fiber optik kablo üreticilerinden birinde fiber optik kablo üretimine ait özellikleri incelemektedir ve Taguchi deneY tasarımı yöntemiyle en uygun çalışma faktörlerine karar vermektedir. Fiber optik kablunun üretiminde zayıflamaya etkisi düşünülen çalışma faktörleri beyin fırtınası tekniği ile ilgili uzman ve akademisyenlerden oluşan bir ekip tarafından belirlenmiştir. Optimal çalışma koşullarını belirlemek için L27 (37) ortogonal matris kullanılmış ve gerçekleştirilen deneyler ile tespit edilen parametrelerin zayıflama değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca her proses parametresinin zayıflama üzerindeki önemi Varyans Analizi (ANOVA) testi ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları tartışılmış ve şirket için optimum çalışma koşulları, 18 °C Ortam Sıcaklığı, 3,0-6,0 mm Excess Uzunluğu, Orta kalite PBT, Yüksek Kalite Thixojel, 80 mm Hatve Uzunluğu, 185-190 °C Extruder Sıcaklığı, 1,0-1,5 bar Çekme Kuvveti olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Taguchi yöntemi, optik fiber, fiber optik kablo.

### Fiber Optic Cable Production Process Optimization with Taguchi Experimental Design

**Abstract:** It is an undeniable fact that the Internet is the most significant discovery in the history of mankind in terms of instant access to communication and information worldwide. Today, the widespread technology enabling the Internet across the globe relies heavily on fiber optic cables. Consequently, the importance of fiber optic cables raises curiosity about how they are manufactured. In the production of fiber optic cables, the attenuation values of fibers are particularly crucial factors for the optical properties of the cable. Cables with attenuation values above a certain threshold are separated from production as defective products, negatively impacting operational efficiency. This study examines the characteristics of fiber optic cable production at one of Turkey’s major fiber optic cable manufacturers and determines the most suitable operational factors using the Taguchi experimental design method. The operational factors considered to affect attenuation in fiber optic cable production are determined by a team of experts and academicians using brainstorming techniques. An L27(37) orthogonal matrix is employed to determine optimal operating conditions, and the impact of the identified parameters on attenuation is investigated through conducted experiments. Furthermore, the importance of each process parameter on attenuation is determined using Analysis of Variance (ANOVA) tests. The analysis results are discussed, and the optimum operating conditions for the company are determined as follows: Ambient Temperature of 18°C, Excess Length of 3.0-6.0 mm, Medium Quality PBT, High-Quality Thixojel, Line Length of 80 mm, Extruder Temperature of 185-190°C, and Pulling Force of 2.0-2.5 bar.

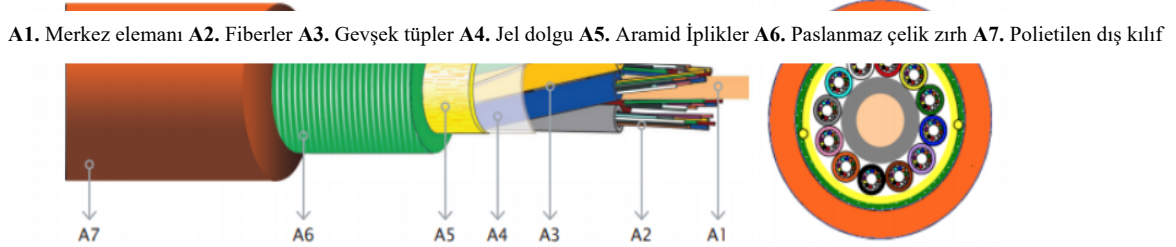
**Key words:** Taguchi method, optic fiber, fiber optic cable.

#### 1. Giriş

Fiber optik teknolojisi, verileri ışık sinyalleriyle taşıyan bir teknolojidir. Veriler silikondan yapılmış ve “fiber” adı verilen mikron ( $\mu\text{m}$ ) ile ölçülebilen boyutlara sahip tüpler vasıtasıyla taşınır [1]. Fiber optik kablo ise, bu fiberlerin çeşitli renklerde akrilik boyalar ile boyanmış hallerinin daha büyük boyutlu tüpler içerisine yerleştirilmiş ve bir merkez mukavemet elemanı etrafında bükülmüş çekirdek, cam elyaf veya mukavemeti yüksek ipler ile koruyucu kılıftan oluşan kablo çeşididir. Fiber optik kablolar bakır iletkenli kablolarla kıyasla, uzun mesafeli iletişimi sağlama (kıtalar arası), yüksek bant genişliği (yüksek miktarda bilgi taşıma), elektromanyetik alanlardan etkilenmeme, radyasyon yaymama, boyut, ağırlık ve esneklik avantajları, kolay kurulum, daha güvenli iletişim sağlama (izlemesi çok zordur) gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Günümüzde ses iletimi, görüntü iletimi ve veri iletimi içeren sayısız uygulamada kullanılmaktadır. Fiber optik kabloların tek modlu veya çok modlu, çok

\* Sorumlu yazar: [ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr](mailto:ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7048-8529, <sup>2</sup> 0000-0001-8061-3322, <sup>3</sup> 0000-0002-1256-2751

modlularda havai kablolar [2] ve zırlı kablolar gibi çok çeşitli türleri bulunmaktadır. Şekil 1’de çok modlu 144 fiberli tek kılıflı zırlı bir fiber optik kabloya ait kesit görülmektedir.



Şekil 1. Fiber optik kabloya ait yapısal kesit [3].

Fiber optik kabloların üretiminde en önemli husus fiber zayıflama değeridir. Üretimin her aşamasında fiber zayıflama değerleri kalite kontrol uzmanları tarafından farklı nanometre (nm) dalga boylarında ölçülerek tüm fiber lifleri için tek tek kontrol edilir [4]. Fiber zayıflama değeri, kablunun veri iletiminde yaşadığı veri kaybıdır. Bu değer farklı dalga boylarında kontrol edilir, farklı fiber cinsleri için kabul edilebilir farklı fiber zayıflama değerleri bulunmaktadır. Üretimde amaç fiber zayıflama değerini üretimin ilk aşamasından itibaren tamamlanincaya kadar minimum seviyede tutarak üretimi tamamlamaktır.

Taguchi yöntemi deney tasarımına farklı bir bakış açısı ile yaklaşarak zaman ve kaynak israfının önüne geçmektedir. Deney tasarımında bağımsız değişken faktör olarak tanımlanırken, bağımsız değişkenin aldığı değerlerde faktör düzeyi olarak tanımlanır. Bu çalışmada Taguchi'nin deneysel tasarım tekniği ile fiber optik kablo üretim sürecindeki faktörlerin nihai ürün üzerindeki olumsuz etkileri minimize edilmiştir. Literatürde Taguchi Yöntemi ile deney tasarımı oldukça fazla sayıda çalışmada kullanılmıştır. Yöntemin bu kadar fazla çalışmada kullanılmasının temel sebebi daha az deney yaparak, tam faktöriyel bir deney tasarımından elde edilmesi beklenen sonuçları elde edebilmektir. Farklı üretim veya hizmet sistemlerindeki süreçleri Taguchi yöntemi ile optimize etmiş son beş yılda Web of Science (WOS) verilerine göre SCI/SCIE indeksli dergilerde yüksek sayıda atıf almış bazı önemli çalışmalara örnekler gösterebiliriz. Viera ve diğ.[5] pirinç kabuğundan elde edilen biyo kömür verimini optimize etmek için Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniğini kullanmıştır. Hossein ve diğ. [6] tekstil sektöründe pamuklu kumaşın yüksek verimle boyanması için kakao kabuğu ekstratları gibi doğal malzemelerin kullanılıp kullanılmayacağını Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile çalışmıştır. Özel ve diğ. [7] termal bariyer kaplamanın (TBC) dizel motor performansına etkisini Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile incelemiştir. Vairamuthu ve diğ. [8] çeşitli girdi proses parametreleri dikkate alınarak toz metalurjisi yoluyla alüminyum bazlı metal kompozit malzeme üretimini Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniğini kullanarak optimize etmiştir. Frifita ve diğ.[9] Inconel 718 isimli Nikel bazlı süper alaşımın tornalamasında işleme parametrelerinin optimizasyonunu Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile sağlamıştır.

Son yıllarda yurtiçinde farklı bilimsel alanlarda yapılan güncel çalışmalara bazı örnekler şöyledir; malzeme bilimi alanında Çelik [10] Ezerek Parlatma yönteminin Inconel 718 alaşımının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırılmasında Taguchi yönteminden faydalanmıştır. Sağlık alanında yapılan bir çalışmada Çelik [11] faz değiştiren malzeme (FDM) takviyeli yalıtımlı bir kan taşıma kabının tasarım parametrelerinin sıcaklık üzerine olan etkisini Taguchi yöntemi ile araştırmıştır. İnşaat mühendisliği alanında yapılan bir çalışmada Arıcı ve Keleştemur [12] Taguchi metodunu kullanarak tufal katkılı harçların basınç dayanımının analizini yapmışlardır. Makine mühendisliği alanında yapılan bir çalışmada ise Özay ve diğ. [13] Taguchi deney tasarım yöntemini kullanarak sementasyon çeliğinin teğetsel silindirik taşlama yöntemi ile işlenmesinde kesme parametrelerinin titreşim üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Şap [14] ise çalışmasında AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin güç tüketimi üzerine etkilerini Taguchi yöntemi ile incelemiştir.

Taguchi deney tasarım yönteminin kullanıldığı çok sayıda yayına literatürde rastlamak mümkündür. Bununla birlikte fiber optik, fiber optik kablo, fiber optik sensör ve taguchi deney tasarımı anahtar kelimeleri birlikte incelendiğinde, sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Jou ve diğ. [15] fiber optik kablo dış kılıfının büzülme oranı üzerinde önemli etkileri olan değişkenleri belirlemek için Taguchi Yöntemini kullanmışlardır. Mohd Arif and Ehsan [16] U şeklindeki fiberin temel geometrik özelliklerinin analizinde Taguchi yönteminden faydalanmıştır. Lin [17] fiber optik konektörlerin en temel bileşeninin üretim sürecini Taguchi yöntemini kullanarak optimize etmiştir. Mudgal et al. [18] bir fiber sensörün teknik tasarım parametrelerinin optimize edilmesinde Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Menon ve Apte [19] fiber optik iletim sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılan Uzun dalga boyu Düşey Kavite Yüzey Yayıcı Lazerler (LW-VCSEL) üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, numerik

olarak simüle edilen bir LW-VCSEL modelinin tepe lazer gücünün optimize edilmesinde Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Boydak ve Yücel [20] fiber optik kabloda meydana gelen raman saçılmasının analizi üzerine çalışmıştır. Özdamar ve Demirer [21] çalışmalarında ekstrüzyon yöntemiyle aydınlatma amaçlı fiber optik kablo üretimini deneysel olarak gerçekleştirmiş ve tam faktöriyel bir deney tasarımı ile proses parametrelerinin iyileştirilmesi incelemişlerdir. Eser ve Uğurlu [22] fiber optik kablolarda hat birleştirme hatalarını ve kayıplara olan etkilerini araştırmışlardır. Hatipoğlu ve diğ. [23] çalışmalarında helikopter uçuş test enstrümantasyonunda fiber optik sensörlerin kullanılmasına geniş bir bakışı sunmaktadır.

Çalışmamızın ilgili literatüre katkısı, çok modlu fiber optik kabloların üretim süreçlerinin analitik tekniklerle analiz edilerek, optimize edilmesidir. Bu şekilde, Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak çok modlu bir fiber optik kablonun üretim süreçlerinde optimum parametrelerin tespit edilerek kablonun optik değerlerinde iyileştirme sağlanması hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen optik değerlerdeki %8,5 oranındaki iyileştirme işletmenin sürdürülebilirliğine katkı sağlarken, gelecek çalışmalara da yol gösterici bir kılavuz olmuştur.

Çalışmamızın bundan sonraki kısmı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde Taguchi yöntemi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada ele aldığımız problem ve elde ettiğimiz sayısal sonuçlar değerlendirilmektedir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar özetlenmektedir.

## 2. Metodoloji

Taguchi yöntemi, Taguchi ve Konishi [24] tarafından geliştirilmiş, mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan etkin ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, kontrol edilemeyen koşullar altında, güvenilir ve sağlam sistemler tasarlamaktır [25-26]. Taguchi yöntemi proses optimizasyonu için geliştirilmiş etkili bir yöntemlerden biridir [27]. Taguchi yönteminin deney tasarımına getirdiği farklı bakış açısının özeti şudur; tam faktöriyel deney tasarımına kıyasla çok daha az sayıda deney yaparak dolayısı ile çok daha az çaba harcayarak aynı sonuçları elde edebilmektir. Yöntem, parametrelerin optimal değerlerini belirlemek amacıyla seviye ve sayılarına göre ortogonal diziler kullanarak sonuca ulaşmaktadır. Montgomery'nin (1991) üzerinde çalıştığı ortogonal diziler yapılması gereken deney sayısını oldukça azaltmaktadır [28].

Yöntemde, deneylerin sonuçları sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür [29]. S/N oranı, istenen değerlerden sapan veya bu değerlere yaklaşan kalite özelliklerinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Optimal koşullar, Taguchi yönteminde üç kategoride değerlendirilir [30-31];

**Küçük en iyidir:** Burada kalite karakteristiği negatif değildir ve süreklidir. 0 ile  $+\infty$  arasında değerler alabilir. İstenilen hedef değer 0'dır. Denklem (1)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

$$S/N_s = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanır.

**Nominal en iyidir:** Kalite karakteristiği küçük en iyidir ile benzerdir. Farklı olarak, istenilen hedef değer 0 değildir ve sonludur. Ortalamayı hedefe taşımaya çalışır. Denklem (2)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

$$S/N_N = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{s\bar{y}} \right) \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanır.

**Büyük en iyidir:** Burada da kalite karakteristiği negatif değildir ve süreklidir. 0 ile  $+\infty$  arasında değerler alabilir. İstenilen hedef değer (olabildiğince büyük)  $+\infty$ 'dur. Denklem (3)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

$$S/N_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right) \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Taguchi yönteminin herhangi bir süreç parametresini optimize edebilmek için önerdiği standart prosedür şu adımlardan oluşmaktadır [32];

- Optimize edilecek kalite karakteristiğinin belirlenmesi.
- Gürültü faktörlerinin ve test koşullarının tanımlanması.
- Kontrol edilebilen faktörlerinin ve bunların alternatif seviyelerinin tanımlanması.
- Ortogonal dizilerden faydalanarak deney tasarımının hazırlanması ve deneylerin gerçekleştirilmesi.
- Verilerin analiz edilmesi ve kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin belirlenmesi.
- Bu seviyelerdeki performansın tahmin edilmesi.

Bu çalışmada üretimden kaynaklanan fiber optik kabloların zayıflama değerlerinin minimum seviye tutulması amaçlandığından ne kadar düşük olursa o kadar iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca, hangi parametrelerin sonuç üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu, hangisinin daha az etkiye sahip olduğunu belirlemek genellikle bir varyans analizi (ANOVA) ile sağlanmaktadır.

Deney tasarımları esnasında her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki etkisi, üretim parametrelerinin doğru belirlenebilmesi açısından anahtar bir rol üstlenmektedir. Bu açıdan bakıldığında Varyans analizi (ANOVA), her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki göreceli katkısını belirlemek ve önemli faktörleri önemsiz olanlardan ayırmak için deney tasarımlarında yaygın biçimde kullanılan bir istatistiksel araçtır. Dolayısıyla ANOVA uygulaması, yürütülen bir deneyde yanıt değişkenini etkileyen tüm değişkenler arasından önemli bağımsız değişkenlerin tanımlanmasını ve bunların yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır [33-34].

### 3. Vaka Çalışması ve Tartışma

Bu bölümde, vaka çalışması olarak fiber optik kabloların üretim sürecine etki eden faktörlerin Taguchi yöntemi ile optimize edilmesi anlatılmıştır.

#### 3.1 Problemin Tanımı

Fiber optik kablo üretimi, incelediğimiz tesiste 7 aşamada tamamlanmaktadır;

- İlk aşamada 50,4 km boya sarılı olarak ithal edilen fiberler 1800 m/dak üretim hızı ile özel bir boya ile boyanmaktadır.
- İkinci aşamada boyalı fiberler “PBT (Polibütilen Tereftalat)” malzemeden üretilen “gevşek(loose)” tüpler içerisine “Thixojel” jeli ile yerleştirilmektedir. Bu aşamada ayrıca fiberlerin tüpler içerisindeki uzunluğu da kontrol edilmekte, bir büküm olacağından dolayı fiberler tüpler içerisine 3/1000 oranı ile yerleştirilmektedir. Yani, 1000 metrelik tüp içerisine 1003 metre boyunda fiberler bulunmaktadır. Teknik olarak “Excess Uzunluğu” olarak isimlendirilen bu yerleşme, Excess testi isimli test ile kontrol edilmektedir.
- Üçüncü aşamada tüpler lif takviyeli polimer (FRP) bir yapıdaki merkez eleman etrafında 4 kez sağa, 4 kez sola olmak kaydıyla bükülmektedir. Bu yapı fiber optik kablonun özü (core) veya çekirdeğini oluşturmaktadır.
- Dördüncü aşamada eğer kablo çift kılıflı bir yapıya sahip olacaksa öz üzerine düşük yoğunluklu polietilen malzeme (LDPE) ile iç kılıf çekilmektedir. Aksi takdirde bu aşamaya gerek bulunmamaktadır.
- Beşinci aşamada eğer kablo zırlı bir yapıya sahip olacaksa uygun bir paslanmaz galvanizli çelik zırlı ile kaplanmaktadır. Aksi takdirde bu aşamaya da gerek bulunmamaktadır.
- Altıncı aşamada kabloyu çeşitli dış etkenlerden koruyucu orta veya yüksek yoğunluklu polietilen malzeme (MDPE, HDPE) ile dış kılıf çekilmektedir. Bu aşamada kablo tasarımına bağlı olarak değişen miktar ve ölçülerde kablo mukavemetini artıran aramid iplik, herhangi bir durumda kolay soyulma işlemi için soyma ipi veya suyun kablo içerisinde ilerlemesini engelleme için şişen iplikler de kullanılabilir. Ayrıca, bu aşamada kablo mukavemetini artıran aramid iplik, herhangi bir durumda kolay soyulma işlemi için soyma ipi veya suyun kablo içerisinde ilerlemesini engelleme için şişen iplikler de kullanılabilir.
- Son aşamada ise kablo 2000m ± 100m veya 4000 m ± 100m şeklinde yekpareler ile makaralara paketlenmektedir.

Probleminiz, nihai ürünlerde karşılaşılan fiber liflerindeki yüksek optik zayıflama değerleridir. Zayıflama değerleri, şartnamelerde belirtilen değerlerin çıkması durumunda ürün atılabilir olarak değerlendirilmektedir. Diğer bir ifade ile üretim hammadde israfı, enerji israfı, işgücü israfı, sermaye israfı, zaman israfı gibi israflar ile sonuçlanmaktadır. Dolayısı ile üretimin her safhasında kontrol edilen fiber zayıflama değerlerinin istenilen aralıklarda bulunması için üretim sürecine etki eden parametrelerin optimum seviyelerde olması gerekmektedir. Çalışmada, G652D cinsi fiber kullanan dış çapı 2,0 mm, iç çapı 1,4 mm ve merkez elemanı 2,2 mm olan fiber optik kablo özüne sahip kablo için üretim sürecini minimum fiber zayıflama değeri ile tamamlayacak optimum proses koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Tedarikçiden gelen G652D cinsi fibere ait özelliklerde 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değeri  $\leq 18$  şeklindedir [35]. Üretici firma ise ürettiği fiber optik kablolarında bu değeri  $\leq 25$  şeklinde belirlemiştir. Ancak, tüketici firmaların çoğu şartnamelerinde bu değer  $\leq 22$  şeklinde olmasını istemektedirler. Dolayısı ile işletme üretimde fiber zayıflama değerlerine azami ölçüde dikkat ederek üretimi gerçekleştirmek zorundadır. Çalışmamıza ait akış diyagramı Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Akış diyagramı.

### 3.2. Parametrelerin ve Ortogonal Dizilerin Seçimi

Üretimde fiber zayıflama değerlerini etkileyebileceği düşünülen tüm kontrol edilebilir parametreler uzman bir ekip tarafından gerçekleştirilen beyin fırtınası tekniği ile tespit edilmiştir. Bu uzman ekip; üretim müdürü, üretim mühendisi, üretim şefleri, kalite kontrol mühendisi, kalite kontrol şefleri, vardiya amirleri ve akademisyenlerden oluşmaktadır. Belirlenen parametrelerin, zayıflama değerini minimumda tutma amacına eşit değerlerde etki edeceği düşünülmektedir. Literatürde çok kriterli karar verme metotlarını kullanarak farklı amaçlar Taguchi Deney tasarımı ile hibrit şekilde kullanılarak optimize edilmiştir [36]. Ancak problemimizde ele aldığımız amaç tekdir ve ürünün atıl duruma düşmesine sebebiyet verebilecek hayati önemdedir. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Parametreler ve seviyeleri.

Parametreler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1 Ortam sıcaklığı	A °C	18	22	33
2 Excess Uzunluğu	B mm	0-1,5	1,5-3,0	3,0-6,0
3 PBT Cinsi	C	Basf	KP270	Vestadur 3013
4 Thixojel Cinsi	D	Itcojel	Mwo	Daewoon Op100
5 Hatve Uzunluğu	E mm	75	80	85
6 Extruder Sıcaklığı	F °C	170-180	185-190	195-200
7 Çekme kuvveti	G Bar	1,0-1,5	2,0-2,5	3,0-3,5

Tam faktöriyel bir deney tasarımı ile üretim sürecini optimize etmek için  $3^7$  yani 2187 adet deney yapmak gerekmektedir. Ancak Taguchi deney tasarımı yöntemi ile daha düşük sayıda deney yaparak aynı sonuçları elde etmemiz beklenmektedir. Bu sebep ile 7 parametre ve 3 seviye için L27(3<sup>7</sup>) Taguchi Ortogonal dizisi kullanılmıştır. Bu ortogonal diziyeye göre hazırlanan deney planı, 1550 nm dalga boyunda ölçülen fiber zayıflama değerleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Tablo 2’de gösterilen deney planına göre, örneğin deney 1 için belirlenen bütün parametreler seviye 1’de ayarlanarak üretim gerçekleştirilmiş ve bu üretim sonucu üretilen kablunun 1550 µm dalga boyundaki zayıflama değeri kalite kontrol şefleri tarafından fiber optik OTDR cihazı ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler uzman ekip gözetiminde, üretimi gerçekleştiren işgücünü kullanarak, üretimi incelediğimiz tesislerde yapılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen 27 adet deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** L27(37) Deney Planı ve Fiber Zayıflama Değerleri.

Deney	A	B	C	D	E	F	G	1550 nm Zayıflama değeri	Deney	A	B	C	D	E	F	G	1550 nm Zayıflama değeri
1	1	1	1	1	1	1	1	22,724	15	2	2	3	1	3	1	2	21,105
2	1	1	1	1	2	2	2	21,844	16	2	3	1	2	1	2	3	22,138
3	1	1	1	1	3	3	3	22,641	17	2	3	1	2	2	3	1	22,035
4	1	2	2	2	1	1	1	20,138	18	2	3	1	2	3	1	2	21,651
5	1	2	2	2	2	2	2	19,521	19	3	1	3	2	1	3	2	22,752
6	1	2	2	2	3	3	3	19,684	20	3	1	3	2	2	1	3	22,631
7	1	3	3	3	1	1	1	19,447	21	3	1	3	2	3	2	1	22,412
8	1	3	3	3	2	2	2	19,085	22	3	2	1	3	1	3	2	21,622
9	1	3	3	3	3	3	3	19,348	23	3	2	1	3	2	1	3	21,512
10	2	1	2	3	1	2	3	21,343	24	3	2	1	3	3	2	1	21,422
11	2	1	2	3	2	3	1	21,125	25	3	3	2	1	1	3	2	20,742
12	2	1	2	3	3	1	2	21,328	26	3	3	2	1	2	1	3	20,848
13	2	2	3	1	1	2	3	20,712	27	3	3	2	1	3	2	1	20,626
14	2	2	3	1	2	3	1	21,010									

### 3.3. Sinyal Gürültü (S/N) Oranı ve Varyans Analizi

Taguchi yönteminde S/N oranı, sürece ait kalite karakteristiğini değerlendirmek ve nasıl olması gerektiğini tespit edebilmek için kullanılmaktadır. Uygulamamızda fiber optik kablo üretim süreci sonunda fiberlere ait zayıflama değeri mümkün oldukça tedarikçiden geldiği şekli ile kalması amaçlanmaktadır. Dolayısı ile küçük en iyidir kalite özelliği istenmektedir. Tablo 3'te deneylere ait gözlemlerin ortalaması (tek gözlem değeri bulunmaktadır) ve eşitlik 4 ve eşitlik 5'in kullanılması ile elde edilen S/N oranları yer almaktadır.

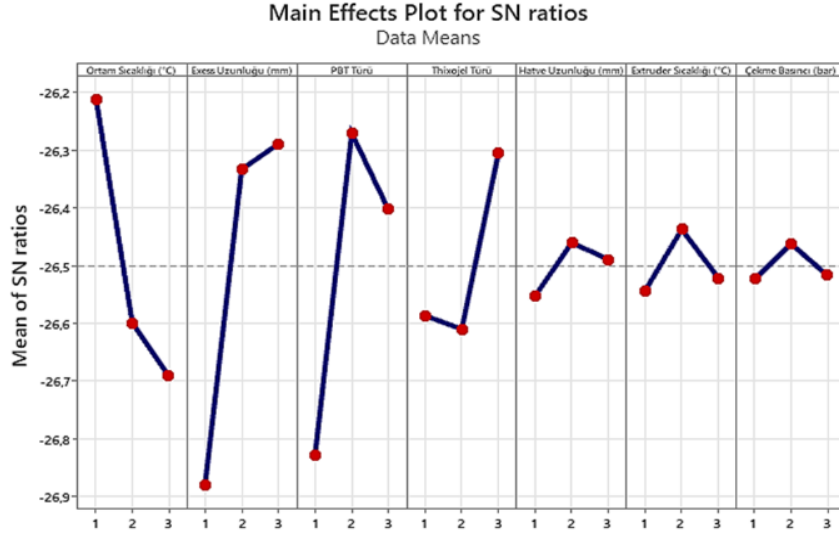
$$MSD = \frac{1}{n} \sum (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) = \frac{1}{1} \cdot 22,724^2 = 516,380 \quad (4)$$

$$S/N = -10 * \log(MSD) = -10 * \log(516,380) = -27,130 \quad (5)$$

Her faktöre ait 1., 2. ve 3. seviyelerin S/N oranına yönelik etkisi Şekil 3'te grafiksel olarak gösterilmekte olup ilgili veriler Tablo 4'te özetlenmiştir. S/N oranının en büyük değere sahip olması istenmektedir. Örneğin A parametresinin 3. seviyesini seçersek kalite özelliği düşecektir. Bununla birlikte 1. seviye A parametresi, 3. seviye B parametresi, 2. seviye C parametresi, 3. seviye D parametresi, 2. seviye E parametresi, 2. seviye F parametresi ve 2. seviye G parametresi S/N oranını yükseltecektir. Dolayısıyla  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  optimum durumu ifade etmektedir. Bu durumda en iyi faktör düzeyi kombinasyonu Tablo 5'te gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 3.** L27(37) Deney Planı ve Fiber Zayıflama Değerleri.

Deney	Gözlem	Ortalama	MSD	S/N	Deney	Gözlem	Ortalama	MSD	S/N
1	22,724	22,724	516,380	-27,130	15	21,105	21,105	445,421	-26,488
2	21,844	21,844	477,160	-26,787	16	22,138	22,138	490,082	-26,903
3	22,641	22,641	512,615	-27,098	17	22,035	22,035	485,559	-26,862
4	20,138	20,138	405,539	-26,080	18	21,651	21,651	468,774	-26,710
5	19,521	19,521	381,069	-25,810	19	22,752	22,752	517,654	-27,140
6	19,684	19,684	387,460	-25,882	20	22,631	22,631	512,162	-27,094
7	19,447	19,447	378,186	-25,777	21	22,412	22,412	502,298	-27,010
8	19,085	19,085	364,237	-25,614	22	21,622	21,622	467,511	-26,698
9	19,348	19,348	374,345	-25,733	23	21,512	21,512	462,766	-26,654
10	21,343	21,343	455,502	-26,585	24	21,422	21,422	458,902	-26,617
11	21,125	21,125	446,249	-26,496	25	20,742	20,742	430,231	-26,337
12	21,328	21,328	454,905	-26,579	26	20,848	20,848	434,639	-26,381
13	20,712	20,712	428,987	-26,324	27	20,626	20,626	425,432	-26,288
14	21,010	21,010	441,420	-26,449					



Şekil 3. S/N oranına göre faktör seviyesinin grafiksel olarak gösterilmesi.

Tablo 4. Zayıflama değeri için S/N oranları.

Seviye	1	2	3	Sıra
Ortam Sıcaklığı	<b>-26,2123</b>	-26,5995	-26,6910	3
Excess Uzunluğu	-26,8798	-26,3336	<b>-26,2894</b>	1
PBT Türü	-26,8286	<b>-26,2710</b>	-26,4032	2
Thixojel Türü	-26,5868	-26,6101	<b>-26,3058</b>	4
Hatve Uzunluğu	-26,5527	<b>-26,4607</b>	-26,4894	6
Ekstruder Sıcaklığı	-26,5436	<b>-26,4376</b>	-26,5217	5
Çekme Kuvveti	-26,5232	<b>-26,4625</b>	-26,5171	7

Tablo 5. S/N orana göre optimum koşulların kombinasyonu.

	A	B	C	D	E	F	G
Seviye	1	3	2	3	2	2	2
	<b>18 °C</b>	<b>3,0-6,0 mm</b>	<b>KP 270</b>	<b>Daewoon Op-100</b>	<b>80 mm</b>	<b>185-190 °C</b>	<b>2,0-2,5 Bar</b>
	Ortam Sıcaklığı	Excess Uzunluğu	PBT Türü	Thixojel Türü	Hatve Uzunluğu	Ekstruder Sıcaklığı	Çekme Kuvveti

Tablo 5'te özetlenen verilere göre ortam sıcaklığının 18 °C, excess uzunluğunun 3,0-6,0 mm, hatve uzunluğunun 80 mm, ekstruder sıcaklığının 185-190 °C ve çekme kuvvetinin 2,0-2,5 bar şeklinde üretim parametresi olarak ayarlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, PBT türü olarak KP 270 ve Thixojel türü olarak Daewoon Op-100 ürünlerinin kullanılmasının optimum sonuçları verdiği belirlenmiştir.

S/N oranı ile analizden sonra genellikle hangi parametre veya parametrelerin sonuç değerleri üzerindeki anlamlı etkiye sahip olduğu ya da hangilerinin önemsiz olduğu yapılan ANOVA ile elde edilmektedir [33-34]. Tablo 6'da gözlem değerlerinin ortalaması kullanılarak gerçekleştirilen ANOVA tablosu özetlenmiştir. Tablo 6'da özetlenen verilere göre %95 güven seviyesinde ve 0,05 anlamlılık düzeyinde elde edilen sonuçlar ortam sıcaklığı, excess uzunluğu, PBT türü, thixojel türü ve ekstruder sıcaklığı faktörlerinin nihai ürünün kalite özelliği üzerinde istatistiksel açıdan anlamlı etkileri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, her bir faktörün ürün özelliklerine



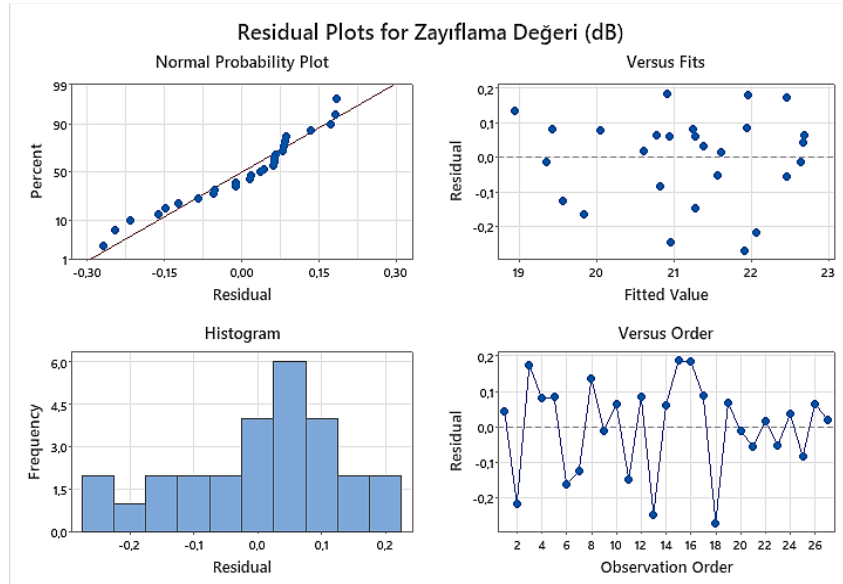
olan katkısı da aynı tabloda yüzdesel olarak belirtilmiş olup bu katkı, her bir faktörün ürün kalitesi üzerinde ne kadar öneme sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu değerlendirmeye göre ürün kalitesine en yüksek katkıyı excess uzunluğu faktörü sunarken PBT türü, ortam sıcaklığı, thixojel türü ve extruder sıcaklığı azalan oranda etki etmektedir. Bununla birlikte hatve uzunluğu ve çekme kuvvetinin anlamlı bir etki ortaya koymadığı görülmektedir. Aynı tabloda, modelin  $r^2 = \%98,65$  oranında açıklanabilir olduğu da belirlenmiştir.

Gözlemlerdeki varyasyonu ve model uyumunun iyiliğini göstermesi amacıyla Regresyon ve ANOVA analizlerinde artık grafiğinden sıklıkla yararlanılmakta olup deneylerden elde edilen gözlemleri içeren ve Minitab paket programı yardımıyla elde edilen bu grafikler Şekil 4'te gösterilmektedir. Artık-uyum grafiği, 0 noktasının her iki tarafında yer alan artık değerlerinin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Verilerin dağılımı incelendiğinde, 0 çizgisinin altında veya üzerindeki verilerin herhangi bir baskınlığının söz konusu olmaması nedeniyle normallik varsayımının geçerli olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Artık değerler için oluşturulan histogram ise verilerin genel dağılımı hakkında fikir edinebilmeyi sağlayan bir araç olup geniş bir dağılıma sahip verilerde daha uzun kuyrukların oluştuğu gözlenmektedir.

**Tablo 6.** Deney sonuçlarının varyans analizi (ANOVA).

Kaynak	SD	Kareler Top.	Katkı	Kareler Ort.	F	p
PBT Türü	2	8,97	%28,91	4,48	128,72	0,000
Thix. Türü	2	3,04	%9,79	1,52	43,61	0,000
Ort. Sıcaklığı	2	6,35	%20,47	3,18	91,14	0,000
Exc. Uzunluğu	2	11,57	%37,29	5,78	166,03	0,000
Hatve Uzunluğu	2	0,24	%0,76	0,12	3,38	0,069
Ext. Sıcaklığı	2	0,33	%1,05	0,16	4,69	0,031
Çek. Kuvveti	2	0,12	%0,37	0,06	1,66	0,231
Hata	12	0,42	%1,35	0,03		
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>31,02</b>	<b>%100</b>			

$r^2 = \%98,65$



**Şekil 4.** Artık Grafikleri.

### 3.4. Optimum ile Mevcut Üretim Koşulları ve Güven Aralığı

Optimum üretim koşulları için gerekli olan parametre seviyeleri  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  şeklindedir. Tablo 7’de gösterildiği üzere bu koşullara ait parametre seviyelerinin S/N oranı -25,4344 ve ortalaması 18,6012’dir. Ancak mevcut üretim koşulları parametre seviyeleri  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$  şeklindedir. Bu koşullara ait parametre seviyelerinin Tablo 7’de de gösterildiği üzere S/N oranı -26,531 ve ortalaması 21,329’dur. Buna göre optimum üretim şartlarında üretim gerçekleştirsek fiber zayıflama değerlerini yaklaşık %8,5 oranında iyileşme beklemekteyiz.

**Tablo 7.** Üretim Koşulları ile Optimum Koşulların Karşılaştırılması.

	Mevcut Parametre Seviyeleri	Optimum Parametre Seviyeleri
Seviye	$A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$	$A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$
Ortalama	20,3291	18,6012
S/N	-26,1693	-25,4344

Tablo 7’de bulunmakta olan ortalama ve S/N oranı değerleri hesaplanırken tüm faktörler dikkate alınmış olup zayıflama değerinin ortalaması yalnızca bu parametre üzerinde istatistiksel açıdan anlamlı olan A, B, C, D ve F faktörlerinin optimum seviyesi kullanılarak hesaplanmıştır. Optimum şartları ifade eden  $A_1, B_3, C_2, D_3$  ve  $F_2$  faktör seviyelerinde elde edilecek sonuçlar için güven aralığı, %95 güven seviyesinde  $18,519 \leq$  doğrulama deneylerinin ortalaması  $\leq 19,059$  aralığında bulunmuştur. Optimum koşullar altında yapılan yeni doğrulama deneyinin ortalamasının bu aralıkta olması, kalite karakteristiği değerlerinin istatistiksel açıdan da kabul edilebilir olduğuna işaret etmektedir.

### 3.5. Doğrulama Deneyi ve Etkileşim Grafiği

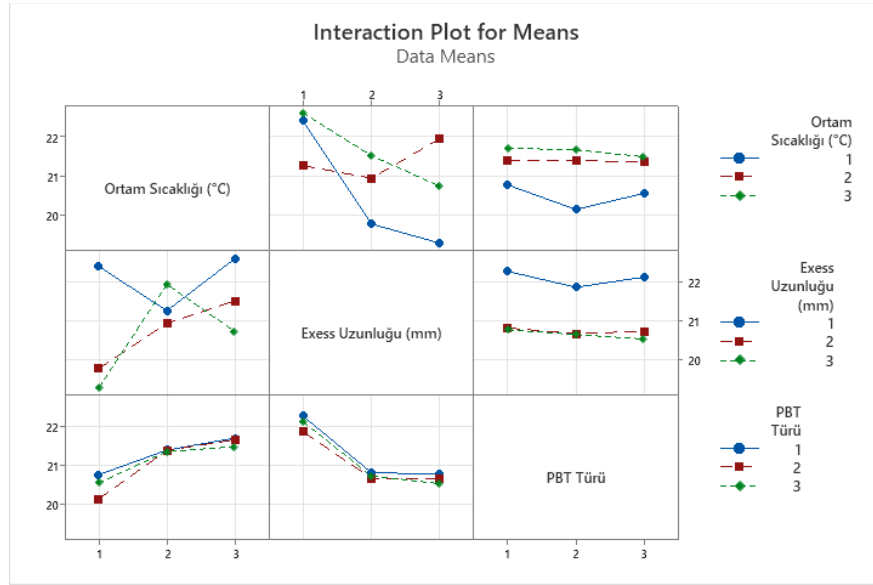
Analiz sonuçlarına göre S/N oranı en küçük fiber zayıflama değeri elde etmek için gereken parametre seviyeleri  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$ ’dir. Bu seviyede 4 adet doğrulama deneyi yapılmış ve deney sonuçlarından elde edilen zayıflama değerleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

**Tablo 8.** Doğrulama deneyleri sonuçları.

Deney No				Ortalama	S/N
1	2	3	4		
18,623	18,895	18,718	18,987	18,806	-25,486

Tablo 8’de de gösterildiği üzere analiz sonuçlarında bulunan kalite karakteristik değerlerinin istatistiksel açıdan da kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Yapılan doğrulama deneyleri sonucuna göre de fiber optik kablonun zayıflama değerlerini en küçük hale getiren parametrelerin seviye kombinasyonu (optimum durum)  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  olarak bulunmuştur.

İki parametre arasında etkileşim olup olmadığını iki parametre ile yapılacak bir deneyle anlamak mümkündür. Etkileşim, grafiksel çizim yardımıyla en açık şekilde görülebilmektedir. Çizgiler arasında paralellik varsa iki parametre arasında etkileşim yoktur. İki parametreye ait doğruların birbiriyle kesiştiği noktalar varsa, bu iki parametre arasında güçlü etkileşim olduğu sonucuna varılmaktadır. Çalışmada ele aldığımız ve önem açısından ilk üç sırada yer alan faktörler arasındaki etkileşim Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 5. Parametrelerin etkileşim grafiği.

#### 4. Sonuç

Günümüzde her işletme hem ulusal hem de uluslararası pazarda varlığını sürdürülebilir bir şekilde büyümek istemektedir. Bunun en temel koşullarından bir tanesi işletmenin verimli bir şekilde üretim gerçekleştirmesidir. Diğer bir ifade ile minimum israf ile sifıra yakın hata ile üretim olmazsa olmaz bir şarttır. Atıl ürünün ortaya çıkma riskinin yüksek olduğu üretim süreçlerinden bir tanesi de fiber optik kablo üretim sürecidir. Fiber optik kablolar, fiber liflerinden üretilmektedir. Bu kabloların en önemli özelliği fiber liflerinin optik değerleridir. Üretim sürecinin her aşamasında kullanılan fiber cinsine de bağlı olarak farklı dalga boylarında kontrol edilen bu değerler nihai üründe istenilen şekilde değil ise, üretim süreci israf olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, fiber optik kablo üretim süreci Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Bu amaçla üretim müdürü, üretim mühendisi, üretim şefleri, kalite kontrol mühendisi, kalite kontrol şefleri, vardiya amirleri ve akademisyenlerden oluşan bir uzman bir ekip, üretim sürecine etki ettiğini düşündüğü kontrol edilebilir parametreleri tartışmıştır. Bu parametrelerin farklı seviyelerinin neler olabileceği tespit edilmiştir. Uzman ekibin hedefi G652D fiber liflerini kullanan kablolarda, 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değerleri  $\leq 22$  şeklinde olacak şekilde üretimi gerçekleştirecek koşulları belirleyebilmektir. Belirlenen kontrol edilebilir parametrelerin farklı parametre değerlerinde tam faktöriyel bir deney tasarımı ile üretim deneyleri gerçekleştirmek işletme için hem zaman kaybedici hem de imkânsız olduğundan, Taguchi deney tasarımı tekniği ile daha düşük sayıda deney üretim devam ederken gerçekleştirilmiştir. Deneyler için L27(3<sup>7</sup>) ortogonal deney tasarım planı belirlenmiş üretim faktörlerinin farklı seviyeleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Üretim faktörleri üç seviyede değerlendirilmiş ve optimum üretim koşulları  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca Taguchi yönteminin tahminlerinin gerçekleştiği doğrulama sonuçları %95 güven aralığında doğrulanmıştır. Düşük zayıflama değerlerini elde edebilmemiz için belirlenen optimum proses parametreleri,

- 18 °C Ortam Sıcaklığı
  - 3,0-6,0 mm Excess Uzunluğu
  - Orta kalite PBT
  - Yüksek Kalite Thixojel
  - 80 mm Hatve Uzunluğu
  - 185-190 °C Extruder Sıcaklığı
  - 2,0-2,5 bar Çekme Kuvveti
- olarak belirlenmiştir.

Optimum üretim koşullarında fiber zayıflama değerlerinde ortalama olarak %8,5 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Bu oran ilk aşamada oldukça başarılı bir sonuçtur. Çünkü mevcut üretimde 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değerleri 24 olan kablolarda,  $\leq 22$  şeklinde olacak şekilde üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ancak

yeterli değildir. Bu sebepten dolayı, kontrol edilemeyen parametrelerin etkisinin araştırılması, bunun yanında daha fazla kontrol edilebilir parametre ve seviyeleri ile sürecin daha fazla iyileştirme ile devam ettirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın, fiber optik kabloların üretim sürecinin optimize edilerek daha düşük zayıflama değerlerine sahip kabloların üretiminin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Böylelikle, hatalı ürün israfının önüne geçilecek, zaman ve kaynak tasarrufu sağlanacaktır. Bu çalışma, benzer diğer reel üretim sektörleri için bir örnek olması umulmaktadır. Gelecekte, faktörlerin ve seviyelerin sayısı yeniden gözden geçirilerek çalışmanın boyutunun artırılması ve sonuçların yeniden değerlendirilmesi öngörülmektedir.

## Teşekkür

Makale Yazarlarının, çalışmaya katkıları şöyledir; İ.K. fikrin oluşması, tasarımın yapılması, deney sonuçlarının elde edilmesi ve taslak makalenin yazımı, S.D. elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan metot ve sonuçların analizi ve incelenmesi ve Ö.F.G. ise literatür taraması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## Kaynaklar

- [1] Hanson DC., Brown W, Garvey S, Girot GF, Heldt E. Integrated Transducer Modules, Connectors and Cable For Industrial Fiber Optic Data Links. IEEE Trans Commun 1978; 26(7): 1068-1076.
- [2] Oestreich UHP. Fiber optic aerial cables. Fiber and Integrated Optics 1982; 4(1): 95-106.
- [3] Boyan F. Fiber Optik Kablo Nedir? Nasıl Çalışır? Multimode ve Singlemode Fiber Optik Kablolar 2024; <https://www.firatboyan.com/multi-single-mod-fiber-optik-kablo.aspx>
- [4] Aydemir G, Ferikoglu A, Odabaş C, Beyhan Z. Optik Fiber İletişim Sistemlerinin Özellikleri. Sakarya University Journal of Science 2003; 7(2): 178-184.
- [5] Vieira FR, Romero Luna CM, Arce G, Àvila I. Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. Biomass&Bioenergy 2020; 132:105412.
- [6] Hossain MY, Liang Y, Pervez MN, et al. Efuient-free deep dyeing of cotton fabric with cacao husk extracts using the Taguchi optimization method. Cellulose 2021; 28, 517-532.
- [7] Özel S, Vural E, Binici M. Optimization of the effect of thermal barrier coating (TBC) on diesel engine performance by Taguchi method. Fuel 2020; 263, 116537.
- [8] Vairamuthu J, Kumar AS, Stalin B, Ravichandran M. Optimization of powder metallurgy parameters of TiC- and B4C-reinforced aluminium composites by Taguchi method. T Can Soc Mech Eng 2020; 45:2, 249-261.
- [9] Frifita W, Salem SB, Haddad A, Yaltese MA. Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 Nickel-base super alloy. Mechanics & Industry 2020; 21:2, 203.
- [10] Çelik M. Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35(1), 333-42.
- [11] Çelik N. FDM Takviyeli Bir Kan Taşıma Kabındaki Sıcaklık Değişiminin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(3), 169-73.
- [12] Arıcı E, Keleştemur O. Tufal Katkılı Harçların Basınç Dayanımının Taguchi Metodu ile Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(3), 145-51.
- [13] Özay Ç, Ballıkaya H, Altuğ M, Savaş V, Sağlam M. Teğetsel Silindirik Taşlama Yönteminde İşleme Parametrelerinin Titreşim Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(1), 311-7.
- [14] Şap S. AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35:3, 13-320.
- [15] Jou YT, Lin WT, Lee WC, Yeh TM. Integrating the Taguchi method and response surface methodology for process parameter optimization of the injection molding. Applied Mathematics & Information Sciences 2014, 8(3), 1277.
- [16] Mohd Arif N. and Ehsan A. Sensitivity optimization of U-shaped fiber optics based on the Taguchi method. OSA Continuum 2021; 4, 2024-2035.
- [17] Lin TY. Design considerations for multi-fiber ferrule manufacturing. Optical Fiber Technology 2006; 12(3), 255-261.
- [18] Mudgal N, Choure KK, Falaswal MK, Pandey R, Agarwal A, Bhatia D, Saharia A, Sahu S, Singh G. Impact of Taguchi Optimization in Fiber Surface Plasmon Resonance Sensors Based on Si3N4 Layer. Braz J Phys 2022; 52(3), 80.
- [19] Menon PS and Apte PR. Taguchi optimization of the peak lasing power of a numerically-simulated double wafer-fused InP/GaAs LW-VCSEL Optoelectron. Adv Mater Rapid Commun 2015; 9(1-2), 40-47.
- [20] Boydak S., Yücel M. Fiber Optik Kabloda Meydana Gelen Raman Saçılmasının Analizi. Politeknik Dergisi 2017; 20(2), 257-265.
- [21] Özdamar O and Demirel A. Manufacture of Large-Diameter Fiber Optic Cable by Extrusion Method and Improvement of Process Parameters. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 17, 718-726.
- [22] Eser E, Uğurlu M. Fiber Optik Kablolarda Hat Birleştirme Hataları ve Kayıplara Olan Etkileri. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2017; 6(3), 55-65.
- [23] Hatipoğlu A, Günaydın AC, Fidanboylu K. Fiber Optik Sensörlerin Helikopter Uçuş Test Enstrümantasyonunda Kullanımı. Veri Bilimi 2019; 2(2), 25-33.

- [24] Taguchi G, Konishi S. Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute. American Supplier Institute 1987; 8-35.
- [25] Byrne DM, Taguchi S. The Taguchi approach to parameter design. Quality Progress 1987; 20(12), 19-26.
- [26] Phadke MS. Quality Engineering Using Robust Design. 1st ed. NJ, USA, Prentice-Hall,1989.
- [27] Khan K, Sahai R. An Overview on Taguchi Method. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences 2012; 1, 11-18.
- [28] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments 3rd ed. New York, USA, John Wiley&Sons, 1991.
- [29] Taguchi G. Introduction to quality engineering. New York, USA, MacMillan, 1986.
- [30] Vankanti V, Ganta V. Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method. J Mater Res Technol 2014; 3:1, 35-41.
- [31] Yılmaz M, Keskin ME. Determination of Optimal Reading Conditions by Taguchi Method. Academic Platform Journal of Engineering and Science 2019; 7:1, 25-32.
- [32] Krishnaiah K, Shahabudeen P. Applied design of experiments and Taguchi methods. PHI Learning Pvt. Ltd, 2012.
- [33] Roy RK. A Primer on the Taguchi Method (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [34] Wackerly DD, Mendenhall W, Scheaffer RL. Mathematical Statistics with Applications (7th ed.). Thomson Learning Inc., 2008.
- [35] Fujikura Ltd. (2024, January 10) FutureGuide®-LWP ITU-T G.652.D (Low(Zero)-Water-Peak Fiber). [https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticalfibers/01/2050061\\_12897.html](https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticalfibers/01/2050061_12897.html)
- [36] AlKaabneh FA, Barghash M, Mishael I. A combined analytical hierarchical process (AHP) and Taguchi experimental design (TED) for plastic injection molding process settings. Int J Adv Manuf Technol 2013; 66, 679-694.

## Taşınabilir Bir Elektrikli Kanallı Fan Test Standı Geliştirilmesi

Emre KARA<sup>1\*</sup>, Mustafa Çağatay ÖZYÜREK<sup>2</sup>, Gamze GÜLSEREN<sup>3</sup>, Ünal HAYTA<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

<sup>4</sup> Pilotaj Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

\*<sup>1</sup> emrekara@gantep.edu.tr, <sup>2</sup> cagatayozyurek@gmail.com, <sup>3</sup> gamzegulsereen@gmail.com, <sup>4</sup> hayta@gantep.edu.tr

(Geliş/Received: 15/02/2024;

Kabul/Accepted: 03/09/2024)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı, elektrikli kanallı bir fanın (EDF) farklı güç oranlarında verdiği itkileri test etmektir. Nozul girişine takılan iki servomotorun hareketiyle 3°, -3°, 6°, -6° açılarında itki yönlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışma ile EDF motorların performans kapasitesinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, EDF motora güç verildiğinde, EDF üzerine yerleştirildiği kızaklı mekanizma sayesinde rahatça hareket edebilmekte ve ürettiği itki, yük hücresi vasıtasıyla akış yönünde ölçülebilmektedir. Çalışmamızda geliştirilen test düzeneğine farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri, daimi akış için farklı dönüş hızlarında elde edilmiştir. Ana çıktılar olan z-yönündeki itki değerleri açılı nozul senaryolarında kaydedilmiş ve grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Ayrıca YZ düzleminde hız kontürleri ve üç boyutlu yolak çizgisi tüm akış alanı için hız değerlerine göre HAD analizler sonucunda gösterilmiştir. Nominal itki değerleri ve standart sapmaları farklı güç yüzdeleri için test edilen açılarda verilmiş ve aynı grafik üzerinde HAD analizi sonuçları karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir. İtki kuvvetlerinin ölçümü sonucunda, güç yüzdesi arttırıldıkça orantılı bir şekilde itki değerinin artmakta olduğu gözlenmiştir. Deneysel sonuçlarla HAD analiz sonuçları birbirleriyle tutarlı ve yakındır. Elde edilen deneysel değerlere lineer (doğrusal) regresyon yapılmış ve "regresyon katsayısı" 1'e yakın elde edilmiştir. Bu durum güç yüzdesi ile itki değerleri arasında oluşturulan doğrusal regresyonun uyumlu olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Elektrikli kanallı fan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, motor itki kuvveti ölçümü, test standı, yük hücresi.

## Development of a Portable Electric Ducted Fan Test Stand

**Abstract:** This study aims to test electric ducted fans (EDF) at various power ratios and to determine EDF motor efficiency. Two servomotors were installed at nozzle inlet to control the thrust at specific angles (3°, -3°, 6°, and -6°). The EDF is placed on a slide mechanism, allowing it to move freely when powered. A load cell is used to measure the thrust produced in the direction of flow. The test setup allows the installation and removal of EDFs with different diameters. Computational fluid dynamics (CFD) analyses were conducted on steady flow at various rotational speeds. Z-direction thrust values were obtained and plotted for angled nozzle scenarios. CFD analyses produced velocity contours in YZ plane and three-dimensional pathlines based on the velocity values of the entire flow field. Nominal thrust values and standard deviations are provided for all angles and power percentages. Thrust value increases proportionally as the power percentage increases, as shown by the measurement of the thrust forces. Experimental results and CFD analysis results are consistent and closely aligned. Linear regression was performed on the experimental values obtained, the "regression coefficient" was obtained close to 1. This shows that linear regression between power percentage and thrust values is compatible.

**Key words:** Electric ducted fan, Computational Fluid Dynamics, motor thrust force measurement, test stand, load cell.

### 1. Giriş

Fanlar hava akımının enerjisini artırır, bu sayede akışın hızı da artar. Elektrikli kanallı fan, İngilizce terimiyle "Electric Ducted Fan" (EDF) bir kanal içine monte edilmiş kanatçıklı bir fanıdır. Bu fanlar, genel kullanımdaki küçük uçaklar, insansız hava araçları (İHA) ve dikey kalkış iniş (VTOL) uçakları dahil olmak üzere birçok araç türünde kullanılmaktadır. EDF üç ana bileşenden oluşur: İtme veya kaldırmayı sağlayan kanatçıklar, fanı çevreleyen kanal ve fana güç sağlayan motor. Genelde kanallı bir fan, kanatçık sayısı ile karakterize edilir. Kanatçıklar sabit veya değişken hatveli olabilir [1]. EDF kullanılan bir uçakta, kanal sadece ana kaldırma yüzeyi değil, aynı zamanda kanatçıkların/pervanelerin hasar görmesini önleme parçasıdır. Uçuş esnasında deforme olmayacak kadar sert yapıda olmalıdır. Kanallı fanların tercih edilme amacı, kanatçıkların uçlarından kayan havanın yarattığı girdapları azaltmaktır. Böylece aerodinamik kayıplar azalır, verimlilik artar. Kanal, daha çok büyük ölçekli uçaklarda önem arz eden bir unsur olarak kanatçıklardan kaynaklanan gürültü emisyonlarını azaltan

\* Sorumlu yazar: [emrekara@gantep.edu.tr](mailto:emrekara@gantep.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-9282-5805, <sup>2</sup> 0009-0001-3714-8450, <sup>3</sup> 0009-0008-1361-3523, <sup>4</sup> 0000-0001-6777-7656

akustik koruma da sağlar. Motorun kanallı olması, iniş-kalkış veya test sırasında çevresinde bulunabilecek canlılara kanatçıkların çarpmasından korur.

Bu çalışmanın planlanma amacı, fırçasız motora sahip bir EDF'nin farklı güç oranlarında verdiği itkiyi test etmektir. Ek olarak, nozul girişine takılan iki servomotorun hareketiyle  $3^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $-6^\circ$  açılarında itki yönlendirmesi (thrust vectoring) yapılmıştır. Özellikle bu tip EDF'lerin kullanıldığı küçük İHA'larda anlık kaçma ve/veya yön değiştirme manevraları için kullanılan itki yönlendirme sistemlerinin deneysel ve sayısal analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Böylelikle bu tip İHA'larda sadece yükselme, alçalma veya belli bir rotada gitme senaryolarının değil, ayrıca manevra kabiliyetlerinin de test edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile EDF motorların performans kapasitesinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. EDF motorların performans kapasitelerinin ölçülmesi için bir test ortamı gerekmektedir. Yapılan çalışmada motora güç verildiğinde EDF üzerine yerleştirildiği kızaklı mekanizma sayesinde rahatça hareket edebilmekte ve ürettiği itki, yük hücresi (load cell) vasıtasıyla akış yönünde ölçülebilmektedir.

Makalede, literatür araştırması Bölüm 1.1'de verilmiştir. Düzenegin tasarımı Bölüm 1.2'de paylaşılmıştır. Sayısal çalışma olan test edilen EDF'nin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışması ve test düzeneğinin hem üretimi Bölüm 2'de gösterilmiştir. Yapılan deneyler ve bu deneylerin HAD analizi ile karşılaştırmaları bulgular kısmında Bölüm 3.1'de tamamlanmıştır. Oluşan sonuçlara göre yorumlar Bölüm 3.2'de yapılmıştır. Bu adımlar sırasıyla aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

### 1.1. Literatür taraması

EDF motorunun ulaşabildiği hızlarda akışkan havanın davranışın incelenmesi, olası türbülans alanlarının ve akış kopma alanların incelenmesi akışkanlar mekaniği alanına dahildir. Mekanik aksamının yorumlanması demek ise motorun platformdaki doğrusal ve eksenel hareketi, fiziksel sınırlamaları, motor kapasitesinin ulaşabileceği hız ve üreteceği itki kuvvetinin incelenmesi anlamına gelmektedir. Bu iki alanı da inceleyen yayınlar dışında, bu çalışmada tasarlanması, sayısal analizlerinin yapılması ve üretilmesi öncesi EDF test standının literatürde yapılmış benzer örnekleri incelenmiş ve en uygun olanlar aşağıda kısaca gösterilmiştir.

Son yıllarda EDF; kompakt yapısı, kanatçıkları ucundaki aerodinamik kayıpları ve sürtünmeyi azaltabilmesi, bir kanal içinde olması nedeniyle çevresindeki insanlar için daha güvenli uçuş sağlaması gibi getirdiği avantajlar ile havacılık alanında kullanımda yaygınlaşmaya başlamıştır. Kullanımı artan bu fanlı motor tipi için akla gelen ilk çalışmalar, akışkan mekaniğinin incelenmesi ve mekanik aksamının yorumlanması olarak ikiye ayrılabilir.

Corva vd. [2] EDF motorunun itki kuvvetini bir yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda motorun gürültü seviyesi de ölçülmüştür. Çalışmamızda gürültü seviyesine bakılmamıştır. Corva vd.'nin düzeneğinden daha basit bir şekilde sadece hassas terazi ile ölçüm yapılan çalışmalar da literatürde vardır ama itki ölçümü için yük hücresi daha hassas ölçüm elde etmek için gerekmektedir. Bu nedenle çalışmamızda yük hücresi kullanılmıştır. Abrego vd. [3] büyük çaplı bir EDF motorunu, değişken kanatçık açılarında göre test ederek farklı itki kuvvetleri elde etmişlerdir ve NASA'daki rüzgâr tüneline performans karakteristiği çalışması yapmışlardır. Buradaki test düzeneği tek bir EDF çapına uygundur. Testin yapılabilmesi için rüzgâr tüneline ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmamızda geliştirilen test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Ayrıca bir rüzgâr tüneli ihtiyaç olmadan deneyler yapılabilmektedir. Yakın zamanda yapılan başka bir çalışmada ise araştırmacılar [4] EDF motoruna vana ve nozul sistemi ekleyerek çeşitli nozul açılarında ölçümler yapmıştır. Urban vd. [4] Çek Teknik Üniversitesi'nde yaptıkları EDF'nin yapısal olarak akış yönlendirmede nasıl etkilerinin olduğu üzerine çalışmışlardır. 64 mm ve 50 mm için denemeler yapmışlardır. Test düzeneği küçük ve taşınabilir. Çalışmamızda geliştirdiğimiz sisteme en benzer düzenek budur. Ancak, bizim sistemimizde ek olarak, elde edilen deneysel veriler Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak veri grafiği oluşturulabilmektedir. Salazar vd. tarafından yapılan çalışma [5] bir öğrenci projesidir. Yukarıda değinilen çalışmalardan daha günceldir. 2020 yılında çalışılmıştır. Eğitim amaçlıdır. Yapılan bu çalışmadan üstünlüğümüz farklı çaplarda EDF motor testi yapabilmemizdir. Bu yayında sadece 90 mm EDF motor kullanılmıştır. Literatür araştırmasına göre çalışmanın amacı ve çıktıları Bölüm 1.2'de belirlenmiştir.

Yukarıdaki paragraftaki literatür araştırmasına ek olarak, test düzeneğimizle benzerlik gösteren patentler ve yeni tarihli yayınlar da incelenmiştir:

Yang [6] buluşunda bir İHA sistemi için geliştirdiği bir simülasyon test yöntemini açıklamaktadır. İHA sistemi, çok eksenli bir platform üzerine yerleştirilmektedir. Simüle edilen hareketin yerdeki bu platform üzerindeki İHA'ya aktarımı sağlamaktadır. Çalışmamızda geliştirilen düzenek de gerçek uçuşun yerini alan, uçuş risklerini azaltan ve test doğrulama süresini kısaltan bir simülasyon test yöntemi ve simülasyon test sistemi sağlamaktadır. Her iki çalışma da servomotor sistemi vasıtasıyla çok eksenli hareket kabiliyetine sahiptir. Bu çalışmadan farklı olarak geliştirdiğimiz test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Ayrıca Yang [6], İHA ile test düzeneğinin bağlantılarının nasıl yapıldığı göstermemiştir. Bizim

çalışmamızda tüm parçaların nasıl birbirleriyle birleştirildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla çalışmamız adım adım prosedürler uygulanarak tekrarlanabilir bir çalışmadır.

Yüzgeç vd. [7], çok rotorlu döner kanat insansız hava araçları için kontrol algoritmalarının ve uçuş denetim parametrelerinin test edilebileceği bir düzenek tasarımı sunmuştur. Bu çalışmadaki İHA test düzeneği ile çalışmamızın ortak yanı farklı eksenlerde hareket ettirilebiliyor olmasıdır. Çalışmada döner kanatlı İHA'lar için bir düzenek geliştirilmiştir, herhangi bir yük ölçümü verisi alınmamış sadece yalpalama, yunuslama ve dönme açılarının PID kullanılarak 100 iterasyon boyunca ölçümleri alınmıştır. Çalışmamızda sabit kanatlı İHA'larda kullanılan EDF ve motor üniteleri için bir test düzeneği hazırlanmıştır ve yük hücreleri kullanılarak kuvvet ölçümleri elde edilmiştir, elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak ve kaydederek veri grafiği oluşturulmuştur. Ayrıca Yüzgeç vd. [7] tarafından geliştirilen test düzeneğinden farklı olarak test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür ve iki servomotor kullanılarak itki yönlendirmesi yapılabilmektedir.

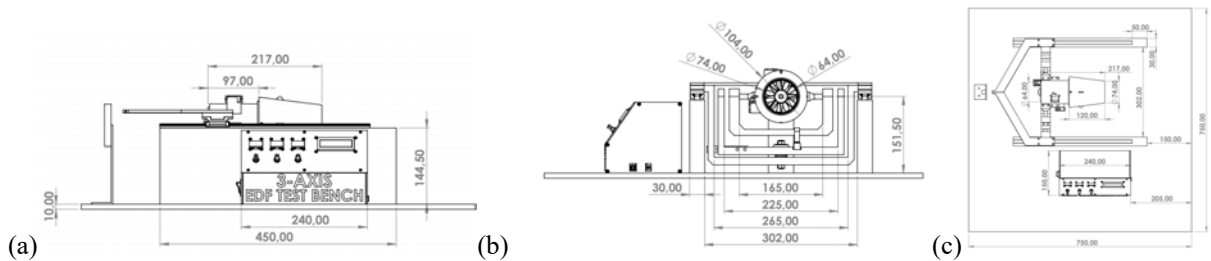
Küçüksezer ve Sancaktar [8] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava araçları için üç eksen kontrollü uçuş test düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışmada, hareket açılarının ve ivmelenmelerin ölçümleri alınmıştır. Çalışmamızla ortak yanı üç eksen kontrollü bir test düzeneği sahip olmalarıdır. Bizim çalışmamızda, bu çalışmadan farklı olarak yük hücreleri kullanılarak kuvvet ölçümleri elde edilmiştir, elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak ve kaydederek veri grafiği oluşturulmuştur. Test düzeneğimiz modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Bu çalışmadan bir başka fark, düzeneğimizin sabit kanatlı İHA'lar için hazırlanmasıdır.

Baran vd. [9] tarafından geliştirilen İHA test düzeneği ile çalışmamızın birinci ortak yanı farklı eksenlerde hareket ettirilebiliyor olmasıdır. İkinci ortak yanı, yük ölçümü yapma kapasitesine sahip olmalarıdır. Çalışmalarında döner kanatlı İHA'lar için bir düzenek geliştirilmiştir. Yukarıda özetlenen diğer çalışmalarda da görülen modüler olmama ve itki yönlendirmesine sahip olmama farklılıkları bulunmaktadır.

## 1.2. Çalışmanın amacı ve çıktıları

Bu çalışmada amaç, literatürdeki sistemlerden daha kolay kullanım olanağı sunan ve taşınabilir bir EDF test düzeneği yapmaktır. Çalışmanın planlanma amacı EDF motorlarının, üretici firma tarafından verilen teknik özellikler sayfasına uygun olarak itki üretip üretemeyeceğini test etmektir. Kullanım alanı oldukça geniş olan EDF motorlarının itki kapasitelerini gözlemlemek amacıyla bir test düzeneği oluşturmak hedeflenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilenler sırasıyla şu şekildedir:

- Literatürdeki çalışmalar incelenip tasarım yapılmış, Solidworks'te çizimi (Şekil 1) tamamlanmıştır.
- Çalışma fikir itibarıyla düşünüldüğünde, akışkanlar/HAD ve mekanik olarak iki ana başlık altında organize edilmiştir. Sayısal yöntemler kullanılarak tasarımın son hali ortaya çıkarılmıştır.
- HAD analizleri, ANSYS Fluent 2022 R2 [10] versiyonunda yapılmıştır. Daimi (steady) akış için farklı dönüş hızlarında veriler elde edilmiştir.
- Raylı sistemde motorun farklı eksenlerde ürettiği itki, deneysel ve HAD analizlerinde hesaplanmıştır.
- Düzenek farklı motorlara adapte edilebilir şekilde tasarlanmıştır.
- Verilerin işlenmesinde açık kaynaklı elektronik kart olarak Arduino kullanılmıştır. Kart, donanım kolaylığı ve bilgi erişimi açılarından kullanıma elverişlidir.
- Elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak kaydederek veri grafiği oluşturmuştur, bu sayede verilerin yorumlanması kolaylaştırılmıştır.



Şekil 1. Tasarımın teknik çizimi: (a) Yandan görünümü, (b) cepheden görünümü, (c) üstten görünümü.

Literatürdeki genel test düzeneklerinden farklı olarak yarattığı yenilikçi avantajlar şunlardır:

- Modüler olup farklı çaplardaki (50 mm, 55 mm, 60 mm, 64 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm, 105 mm, 110 mm, 120 mm, 130 mm) EDF'lerin testi için kullanılabilir. (a)



b. Test edilen EDF çıkışına takılan nozulun yalpalama (yaw) hareketi iki servomotor ile kontrol edilerek itki yönlendirmesi yapılabilmektedir.

c. Tasarlanan test düzeneği, elektrikli motora güç verilmesiyle birlikte kızak üzerinde kayarak hareket etmektedir. Motor ürettiği itkiyle birlikte harekete başlayıp rayın sonuna konumlandırılmış yük hücresine dayanmaktadır.

d. Elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak kaydederek veri grafiği oluşturulabilmektedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Daimi, basınç temelli, üç boyutlu, sıkıştırılamaz hava akışının viskoz akışkanlarda çözüm için girişteki hava yoğunluğunun  $1,225 \text{ kg/m}^3$  ve dinamik viskozitesinin  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$  olduğu çözüm, ANSYS Fluent akış çözücüsü ile koşturulmuştur. Çözümde basınç-hız eşleşmesi için bağlaşıklık çözüm, uzaysal ayrıklaştırma yöntemi için en küçük kareler hücre tabanlı gradyanı kullanan 2. dereceden basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı çözümü kullanılmıştır.

Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin SST k- $\omega$  türbülans modeliyle kapatıldığı (tamamlandığı) denklemlerinin üç boyutlu, sıkıştırılamaz, viskoz akışkanlarda çözümü için akış alanının diferansiyel denklem formu çözümün temelinde her sonlu hacimde ANSYS Fluent içinde çözülmüştür. Bu denklemler sırasıyla, kütle korunumu (Denklem 1), momentumun korunumu (Denklem 2) ve Denklem 2 içindeki  $\overline{\rho u_i u_j}$  Reynolds kaymazlık terimini modellemek için SST k- $\omega$  türbülans modelinde kullanılan denklemler (Denklem 3 ve 4) aşağıda gösterilmiştir [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* f_\beta \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} (-\rho \overline{u_i u_j}) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta f_\beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $\rho$  akışkanın (hava) yoğunluğunu,  $t$  zamanı,  $p$  akışkanın statik basıncını,  $u_i$  ve  $u_j$  z- ve y-yönündeki hız bileşenlerini,  $\mu$  is dinamik viskoziteyi,  $x_i$  ve  $x_j$  seçilen düzleme göre akışa dik ve paralel yönleri temsil etmektedir.  $\beta^*$ ,  $f_\beta$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  k- $\omega$  türbülans modeli değişkenleridir. Denklemler 3 ve 4'teki sağdaki ilk üç terim, hem  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) hem de  $\omega$  (türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı) için, sırasıyla üretim, yıkım ve difüzyon terimleridir. Denklem 3 ve 4'ün çözümü sonucu elde edilen türbülans viskozitesi ( $\mu_t$ ) terimi çözülmekte ve Denklem 2'yi kapatmak için kullanılmaktadır.

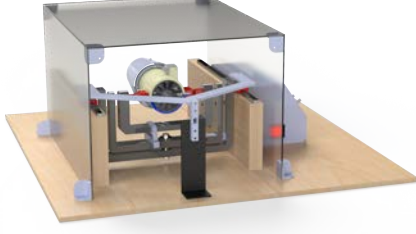
Düzeneğin oluşturulmasında ilk adım olan EDF motorun seçimi yapılırken farklı çaplardaki motorlar araştırıp, masa üzerine uyarlanabilecek, kolay kullanım sağlayacak ölçülerde olmasına dikkat edilmiştir. Test standının, masa üzerine uyarlanabilecek kolay kullanım sağlayacak ölçülerde olmasına özen gösterilmiştir. Kaydırılma mekanizmasının itki ölçümünde herhangi bir engel yaratmayacak olmasına dikkat edilmiştir. Motor çalışır haldeyken itkisinin ne şekilde ölçülebileceğinin kararını verebilmek için yük hücreleri kullanılmıştır.

Farklı çaplarda EDF'lerin kullanımına uygun şekilde özgün bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarım için, patent başvurusunda bulunulmuştur. Verilerin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla her ölçüm için 30 değer okunup ortalamaları ve standart sapmaları alınmıştır. Motorun arkasına yerleştirilen nozulun iki eksende hareketini kolay bir şekilde sağlayabilmek için 2 adet servomotor kullanılmıştır. Yük hücrelerinden okunan veri Arduino Mega aracılığı ile OLED ekranlara yansıtılmıştır. Motora verilen akım Arduino Uno'ya bağlanan potansiyometre aracılığıyla ayarlanmış, ayarlanan değer LCD ekranda gösterilmiştir. Motorun pitch (yunuslama) ve yaw (yalpalama) eksenlerinde kullanılan servomotorların hareketleri Arduino Uno [12] aracılığıyla kontrol edilmiş, Arduino Mega aracılığıyla LCD ekrana yansıtılmıştır. Çalışmanın bitiş tarihi olan 2023 Şubat tarihi itibarıyla TL cinsinden bütçesi 8000 TL'nin altındadır. Bu bütçe dahilinde test düzeneği üretimi ve deneysel çalışmalar altı ay içinde başarı ile tamamlanmıştır.

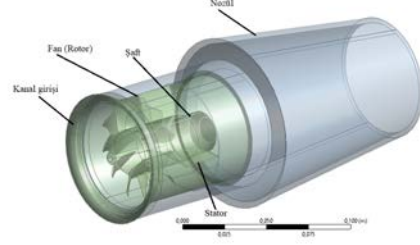
## 3. Bulgular ve Tartışma

Test standında kullanılacak olan EDF'nin gerçek ölçüleri kullanılarak SolidWorks programında çizim yapılmıştır (Şekil 2). Çizim step formatında kaydedilmiş ve ANSYS [10] ortamına aktarılmıştır. Akış analizine uygun hale getirmek için ANSYS DesignModeler içinde geometride iyileştirmeler (Şekil 3) yapılmıştır. Akış alanı

kati duvarlar arasında alınıp “ANSYS Fluent Meshing” modülüne aktarılmıştır. Aşağıda detayları verilen ağ yapısı ve çözücü modülleri AMD Ryzen 7 6800H 8 çekirdek 16 iş parçacıklı işlemcisi, 32 GB 4800Mhz RAM belleği olan taşınabilir bir bilgisayarda çalıştırılmıştır.



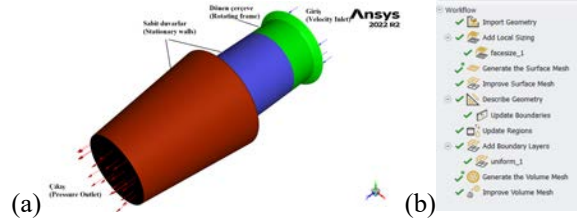
Şekil 2. EDF test standının bilgisayar destekli çizimi.



Şekil 3. Akış alanının bilgisayar destekli çizimi.

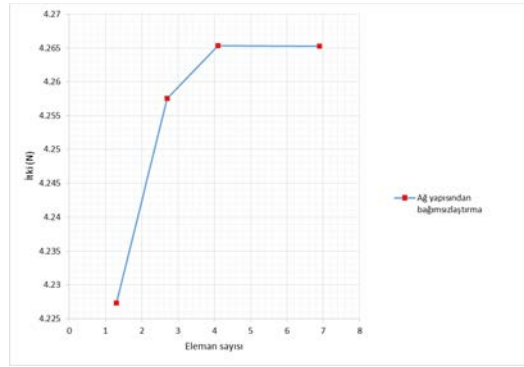
Geometri aşamasından sonra analizin doğru sonuç vermesinde önemli bir etken olan ağ yapısı (mesh) oluşturma aşamasına geçilmiştir. Ağ yapısı kalitesi ne kadar yüksek olursa analiz sonucu da o kadar stabil olmaktadır. Ağ yapısı için ANSYS Fluent ağ yapısı çözümü su geçirmez geometri analiziyle kullanılmıştır. Bu çözümün kullanılmasındaki neden, diğer ağ yapısı oluşturma modülüne göre daha hızlı olması, kademe kademe ilerleyen bir modül olmasından dolayı hatalı ağ yapısı olasılıklarını en aza indirmesidir.

Geometri, Şekil 4.a’da gösterildiği gibi 3 bölgeye ayrılmıştır: hareketsiz ön bölge (mavi bölge), hareketli referans çerçevesi bölgesi (yeşil bölge) ve yarı hareketli (açısal değişimli) arka bölge (kırmızı bölge). Hareketli referans çerçevesi içerisinde rotoru barındırdığı için diğer bölgelere nazaran daha sıkı bir şekilde ağ atılmıştır. Ayrıca bu bölgeler itki sonucunu doğrudan etkileyen, itkiyi yaratan bölgelerdir. Dolayısıyla en yüksek sıklıkta ağ yapısı buradadır. Duvar üzerinde, sınır tabakadaki yüksek gradyanlı hız profilini yakalamak için  $y^+$  değerinin düşük olması hedeflenerek ilk katman kalınlığı 0.038 mm alınmış ve akışa dik yönde 10 katman 1,2 artış oranıyla eklenmiştir.  $y^+$  duvardan itibaren, akışa dik yönde ölçülen boyutsuz mesafedir. Bir duvardan uzaktaki ilk düğümün konumunu kontrol etmek için kullanılır. Bu çalışmada kullanılan SST k- $\omega$  türbülans modeli için  $y^+ < 10$  olmasının yeterli olduğu belirtilmektedir [13]. Şekil 5’te sınır tabakadaki ağ yapısının giriş bölümünde görünümü verilmiştir. Ağ yapısının oluşturulmasında kullanılan adımların tüm akış şeması Şekil 4.b’de verilmiştir.

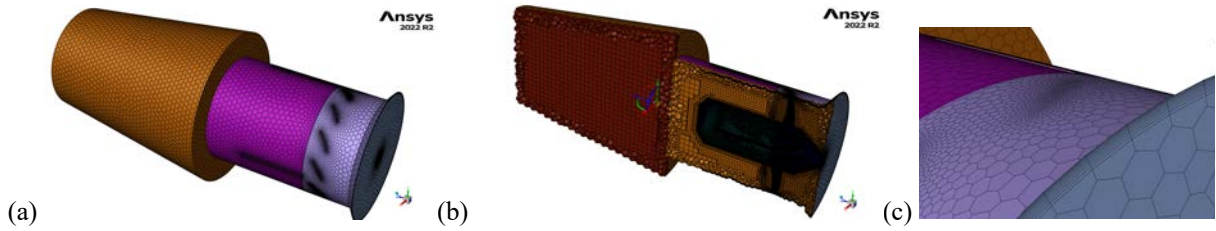


Şekil 4.(a) Akış bölgeleri, (b) ağ yapısı oluşturma akış şeması.

Geometri tanımlandıktan sonra sınır koşulları kontrol edilmiş ve sınır koşulları da, akış şeması (Şekil 4.b) içinde tanımlanmıştır. Bu aşamalar sonucunda sıra hacimsel ağ yapısı oluşturma aşamasına gelmiştir. Yüzeysel ağ atıldıktan sonra ağ yapısı maksimum çarpıklık değeri 0,93 ve hacim ağ atıldıktan sonra da minimum ortogonal kalitesi 0,010564 bulunmuştur. Kaliteli bir ağ yapısı için, minimum ortogonal kalitenin 0,01’den yüksek olması ve maksimum çarpıklık oranının 0,95’ten düşük olması beklenmektedir [11], dolayısıyla bu değerler uygun bir ağ yapısı oluşturulduğunu göstermektedir. Poly-hexcore (honeycomb) hücre tipi tercih edilmiştir. Bu tip hücreler, çok farklı büyüklüklerde parçalar içeren zor geometrilerde verimli sonuçlar vermektedir. Şekil 5’te ağdan bağımsızlaştırma çalışması %30 güçte iken gösterilmiştir. Tüm bu aşamalar sonucunda 4.099.271 eleman sayısındaki ağ yapısı tamamlanmıştır. Ağ yapısının son hali Şekil 6’da verilmiştir.

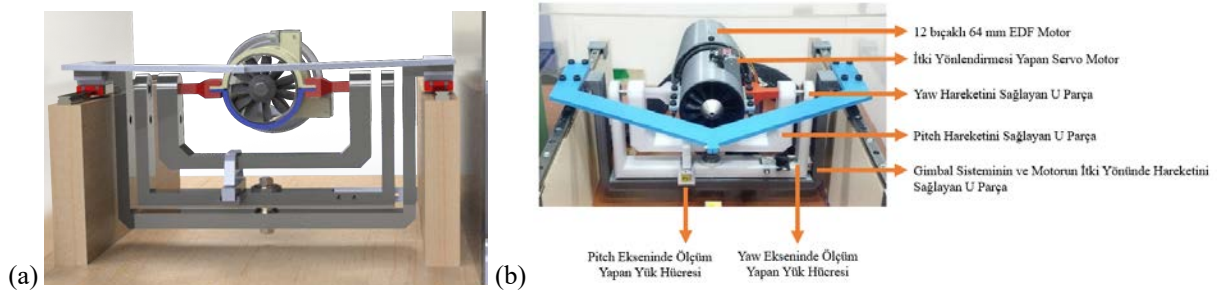


Şekil 5. Ağ yapısından bağımsızlaştırma grafiği.



Şekil 6. (a) Ağ yapısı, (b) kesit gösterimi, (c) sınır tabaka ağına yakından bakış.

Şekil 4.a'da yeşille gösterilen hareketli referans çerçevesi bölgesi (MRF), rotor (blade-main) ve rotor duvarı (blade-root) çerçeve dönüş hızıyla Z yönünde (XY düzleminde) döncek şekilde düzenlenmiştir. Kalan bölgelerde giriş hızı 0,1 m/s (akışı başlatılmak için), çıkış basıncı bağlı değerde 0 Pa, rotor ve rotor duvarı dışındaki tüm duvarlar için kaymazlık (no-slip) sınır koşulu kullanılmıştır. Ana çıktılar olan z-yönündeki itki (thrust force) değerleri, açılı nozul senaryolarında alınmış ve grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Ayrıca YZ düzleminde hız kontürleri ve üç boyutlu yolak çizgisi (pathline) tüm akış alanı için hız değerlerine göre HAD analizler sonucunda gösterilmiştir. Bulgular kısmında, deney sonuçlarıyla birlikte gösterilmiştir ve tartışma kısmında yorumlanmıştır. Motorun gimbalden esinlenerek tasarlanmış bir sistem üzerine yerleştirilerek (Şekil 7), yaw (yalpalama) hareketi ile itki yönlendirmesi (thrust vectoring) yapılmıştır.



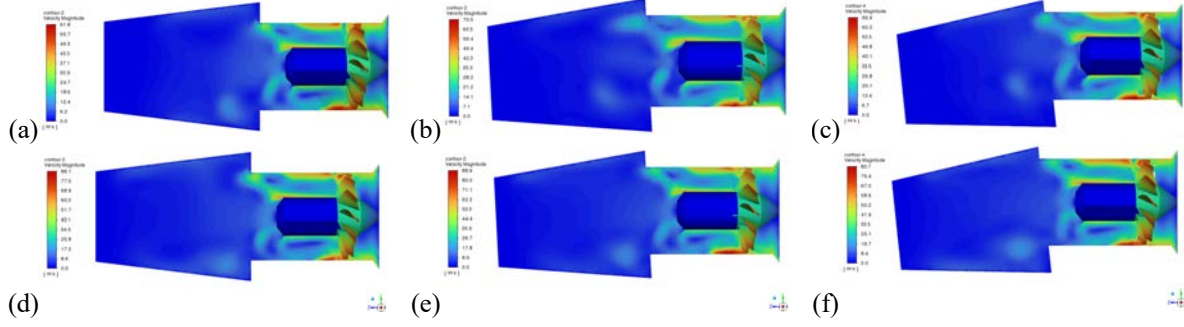
Şekil 7. Motor ve eksen hareketlerini sağlayan Gimbal sistemi (a) tasarımı, (b) bileşenlerinin gösterimi.

### 3.1 Bulgular

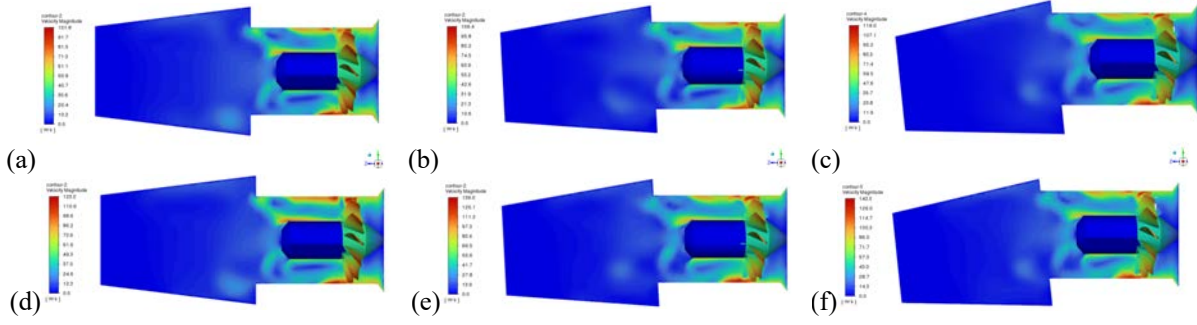
Çalışmanın bu bölümünde, HAD analizi ile deneysel yakın sonuçların sağlanması hedeflenmiştir. HAD analizi ile EDF ve nozul kısmı, ANSYS analiz programı kullanılarak modellenmiş ve yorumlanmıştır.

Bulguların ilk aşamasında HAD çözümleri yapılmıştır. Buna göre sırasıyla 15000 rpm (Güç yüzdesi % 20), 20000 rpm (Güç yüzdesi % 25), 25000 rpm (Güç yüzdesi % 45) ve 30000 rpm'de (Güç yüzdesi % 55) dönen rotorun oluşturduğu akış analizleri 0, ±3 ve ±6 derecelik nozul yönlendirmesi için başarılıdır. Çalışmanın ikinci

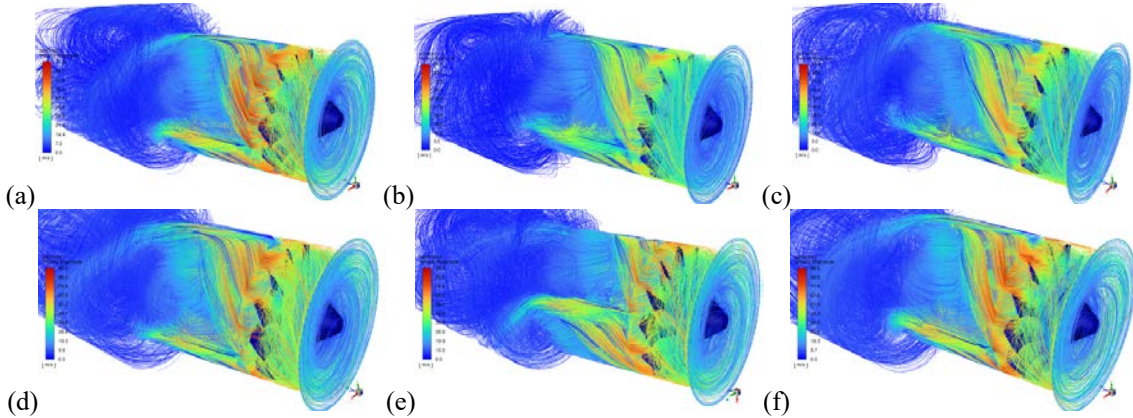
aşamasında kurulan deney düzeneğinde analizler, HAD çözümlerine paralel şekilde gene 0,  $\pm 3$  ve  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için test edilmiştir. Analizleri görselleştirme amacıyla hız kontürleri ve akış yönü çizgileri (pathline) test edilen dönüş hızlarında 0,  $\pm 3$  ve  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için aşağıda Şekil 8 ve 9'da kontürler için ve Şekil 10 ve 11'de akış yönü çizgileri için verilmiştir.



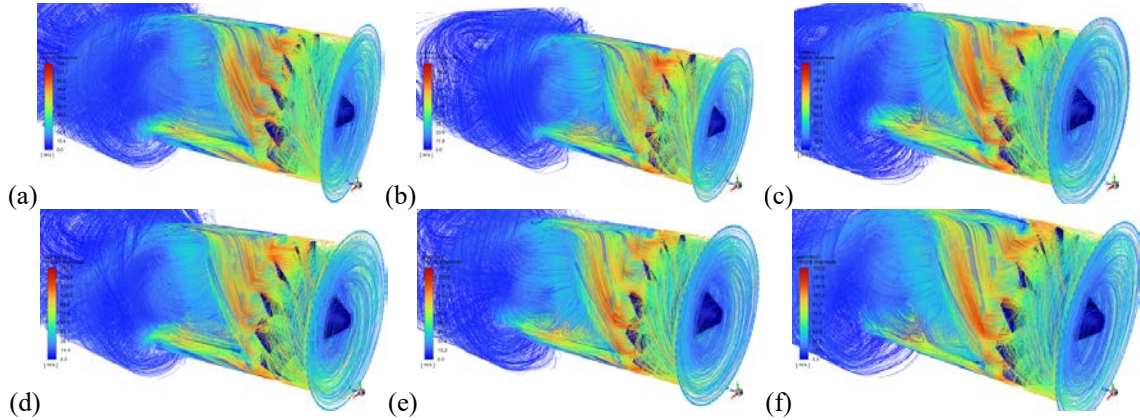
**Şekil 8.** 15000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b)  $\pm 3$  ve (c)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için ve 20000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e)  $\pm 3$  ve (f)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için hız kontürleri.



**Şekil 9.** 25000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b)  $\pm 3$  ve (c)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için ve 30000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e)  $\pm 3$  ve (f)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için hız kontürleri.

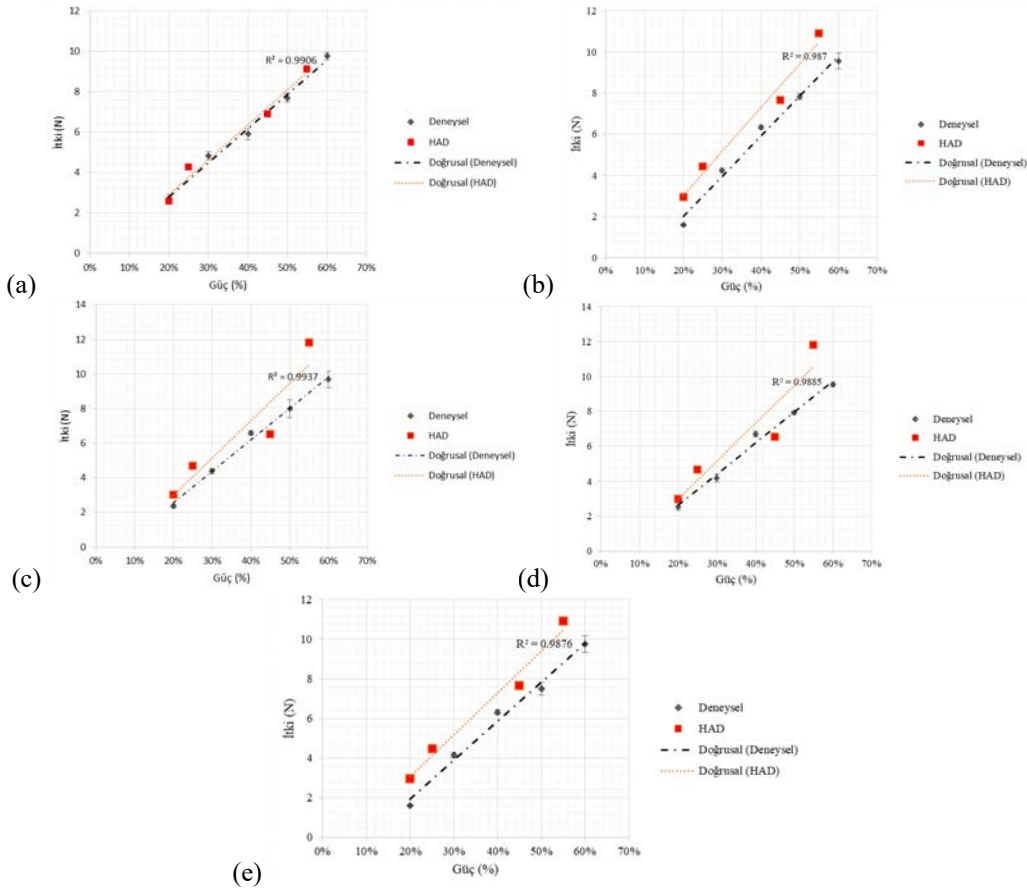


**Şekil 10.** 15000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b)  $\pm 3$  ve (c)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için ve 20000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e)  $\pm 3$  ve (f)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi.



**Şekil 11.** 25000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b)  $\pm 3$  ve (c)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi ve 30000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e)  $\pm 3$  ve (f)  $\pm 6$  derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi.

Önceki bölümde detayları verilen deney düzeneğinin kurulumu sonrası nozul yardımıyla itki yönlendirme yapılarak -6, -3, 0, 3, 6 açılarında itki değerleri elde edilmiştir. Verilerin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla her ölçüm için 30 değer okuyup ortalamaları ve standart sapmaları alınmıştır. Nominal itki değerleri ve standart sapması farklı güç yüzdeleri için tüm açılarda verilmiş, aşağıdaki şekillerde bu değerlere göre Şekil 12’de grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Grafik üzerindeki HAD sonuçları karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir.



**Şekil 12.** Deneysel ve HAD sonuçları itki kuvveti (N) – güç (%) grafikleri: Nozul yönlendirmesi (a) yokken, (b) -3 dereceyken, (c) -6 dereceyken, (d) 3 dereceyken, (e) 6 dereceyken.

Şekil 12’de nozul yönlendirmesinin olduğu senaryolarda deneysel verilerle sayısal çözüm sonuçları arasında bir sapma görülmektedir. HAD analizinde analiz daimi akış için yapılmış olması, deneysel verilerin ise her ölçümde 30 değerinin okunup ortalamaları ve standart sapmaları alınmış olması bu farkı yaratmaktadır. Beklenildiği gibi yüksek güç senaryosu olan %60 için verilerde türbülans etkisi çok yüksek olmaktadır. Bu yüzden deney sisteminin dış duvarlarından geri dönen akış da itkinin yapay şekilde düşüşüne sebep olabilmektedir. 6° için akış, türbülans etkilenip tüm güç oranlarında HAD analizinde gözlemlenen ideal durumdan daha düşük itki oluşturmuştur. Bu durumun daha anlaşılabilir olabilmesi adına eğim çizgilerinin denklemleriyle birlikte Tablo 1’de bu farklılıkların % cinsinden ortalama değerleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel ve HAD sonuçları itki kuvveti (N) verilerinin eğim çizgisine göre farklılıklarının % cinsinden değerleri

Nozul yönlendirmesi	Deneysel eğim çizgisi	HAD eğim çizgisi	Güç değeri (%)	Deneysel itki kuvveti (N)	HAD itki kuvveti (N)	Farklılık (%)
0	$y = 17,312x - 0,5549$	$y = 16,935x - 0,5794$	20	2,9075	2,8076	-3,5582
			30	4,6387	4,5011	-3,0570
			40	6,3699	6,1946	-2,8299
			50	8,1011	7,8881	-2,7003
			60	9,8323	9,5816	-2,6165
±3°	$y = 18,237x - 1,0835$	$y = 21,607x - 1,3267$	20	2,5639	2,9947	14,3854
			30	4,3876	5,1554	14,8931
			40	6,21130	7,31610	15,1009
			50	8,035	9,4768	15,2140
			60	9,8587	11,6375	15,2851
±6°	$y = 19,666x - 1,9976$	$y = 21,184x - 1,1848$	20	1,9356	3,052	36,5793
			30	3,9022	5,1704	24,5281
			40	5,8688	7,2888	19,4819
			50	7,8354	9,4072	16,7085
			60	9,802	11,5256	14,9545

### 3.2 Tartışma ve sonuç

İtki değerleri, HAD analizlerinde yukarıda bahsedilen tüm deneysel senaryolarda sabit bir değere yakınsamıştır. HAD analizleri sonucu elde edilen tüm itki kuvveti değerleri grafiklerde gösterilmiştir. 15000 ve 20000 ve 30000 rpm dönüş hızlarında nozul açısı 0 dereceden 3 dereceye çıktığında, itki kuvveti artmaktadır, sonrasında 6 derece açısına çıktığında bu değer düşmektedir. İlginç bir şekilde, 25000 rpm dönüş hızındaki senaryoda nozul açısı 0 dereceden 3’e yükseltildiğinde itki değeri düşmekte ve 6 dereceye geldiğinde tekrar yükselmektedir. Buradaki HAD analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırmaları şekiller üzerinde, deney verileri ile birlikte gösterilmiştir. Dolayısıyla, yorum kısmı deney sonuçları ile birlikte aşağıdaki paragraflarda, HAD görsel analizi yorumlamaları sonrasında yapılmıştır.

HAD analizlerinde akışın görselleştirilmesi amacıyla YZ merkez kesit düzleminde hız kontürleri incelenmiştir. Rotor ve stator bölgesinde görsel açıdan gözlemlenirse de nozul kısmına açı değiştirildikçe açı yönünde akışın yönlendiği görülmektedir. Gene de istenildiği kadar bir yönlendirme olmamıştır, bunun sebebi açıların çok düşük (3 ve 6 derece) olması ve akışın daimi kabul edilmesidir. İkinci görselleştirme tekniği, akış yönü çizgilerinin gösterimidir. Akışın dönerek geldiği bu üç boyutlu gösterimlerde ortaya konulmuştur. Maksimum hız genelde rotorun kanatçıklarının ucunda görülmüştür, fakat nozul açısı arttıkça bu değer rotor çıkışından nozul girişine dek yayılıp akışın yönüne doğru geniş bir alana yayılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen itki kuvveti değerleri, standart sapmalarıyla beraber grafiklerde gösterilmiştir. Güç ünitesinde dönüş hızı değerleri yerine güç yüzdesi gösterilmiştir. İtki kuvvetlerinin ölçümü sonucunda, beklendiği gibi güç yüzdesi arttırıldıkça orantılı bir şekilde itki kuvveti değeri artmakta ve standart sapmaları da  $\pm 0,2$  N civarında gözlenmektedir. Deneysel verilere bakıldığında, İtki değerleri nozul yönlendirmesi yokken % 20 güç oranında 2,9075 N ile başlayıp % 60 güç oranında 9,8323 N değerine yükselen doğrusal bir şekilde ( $y = 17,312x - 0,5549$ ) değişmektedir. Aynı doğrusal değişim  $\pm 3^\circ$  (2,5639 N değerinden 9,8587 N değerine,  $y = 18,237x - 1,0835$  denkleminde göre) ve  $\pm 6^\circ$  (1,9356 N değerinden 9,802 N değerine,  $y = 19,666x - 1,9976$  denkleminde göre) nozul yönlendirme açıları için benzer şekilde gözlenmiştir. Deneysel sonuçlarla HAD analiz sonuçları birbirleriyle tutarlı ve yakındır. Bu durum yukarıdaki şekillerde açıkça gözükmektedir. Elde edilen deneysel değerlere lineer (doğrusal) regresyon yapılmış ve “regresyon katsayısı” 1’e yakın elde edilmiştir. Bu durum güç yüzdesi ile itki değerleri arasında oluşturulan doğrusal regresyonun uyumlu olduğu göstermektedir.

-3 ile +3 açıların verdiği eğim çizgileri (Şekil 11b ve 11d) birbirleriyle örtüşmektedir. Aynı şekilde -6 ile +6 açıların verdiği eğim çizgileri de (Şekil 11c ve 11e) birbirleriyle örtüşmektedir. Tek fark deneylerin  $R^2$  yani korelasyon katsayısının farklı olmasıdır. Bunun nedeni tekrarlanan deneyler sırasındaki yük hücrelerinin hassasiyeti nedeniyle her deneyde yük değerlerini farklı okumak, servomotorlarının açı hassasiyeti nedeniyle aynı açıyı tam okuyamamak gibi, sistematik hataların gösterebilmesidir.

Deneysel verilere bakılırsa güç yüzdesine göre, itki kuvvetleri HAD analizlerindeki gibi doğrusal şekilde artmıştır. Açılarının düşük olması nedeniyle bu kuvvetlerin çok düşük olması beklenmiştir. Açılarının 6’dan daha

yüksek olamamasının nedeni, deneylerde kullanılan servomotorlarının fiziksel sınırdan en fazla bu açığa kadar döndürülebilmesidir. Bu durum, hem nozul geometrisi hem de servomotorun farklı seçilmesiyle giderilebilir.

Literatürde verilen çalışmalar sadece itkiye yönelik olduğu için tek eksenle yapılmıştır. Test edilen EDF motor için 3 eksenle ve 3 derece aralıklarda yapılan başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Test edilen ürünün (QX-Motor 64mm EDF 12 QF2822-4300kv 3s 64mm kanallı fan) kullanma kılavuzuna bakıldığında sadece 3S pil kullanılarak %100 güç için 1550 gr (15.2 N) yük değeri görülmektedir. Çalışmamızda daha yüksek voltajlı 6S pil ve ona uygun ESC sürücü kullanılarak motor sürülmüştür. Bu nedenle kullanım kılavuzundaki değerden daha fazla yük değeri elde edilmesi beklenmiştir. Deneysel eğim çizgimiz olan  $y = 17.312x - 0.5549$  ile hesaplama yapıldığında  $y = 17.312 (\%100) - 0.5549 = 16.75$  N çıkmaktadır. HAD eğim çizgimiz olan  $y = 16.935x - 0.5794$  ile hesaplama yapıldığında  $y = 16.935 (\%100) - 0.5794 = 16.35$  N çıkmaktadır. Çalışmanın planlanma amacı EDF motorlarının, üretici firma tarafından verilen teknik özellikler sayfasına uygun olarak itki üretip üretemeyeceğini test etmektir. Bu durumda üretici firmanın verdiği itki değerlerinin tutarlı olduğu düşünülebilir. Bu çalışmanın ileri aşamasında farklı kV değerlerinde ve farklı ESC sürücülerle bu deneylerin sayısının artırılması planlanmaktadır.

## Teşekkür

Projenin maddi kaynağı Gaziantep Üniversitesi Araştırma Projeleri Yönetim Biriminin (BAP) HUBF.OKAP.22.02 kodlu, aynı başlıklı öğrenci katılımlı araştırma projesinden (ÖKAP) sağlanmıştır. Sistem bileşenleri IOM FabLab Uygulama Merkezinde 3B yazıcı ile basılmıştır. E.K. fikir sahibidir. G.G. ve M.Ç.Ö. deneyleri gerçekleştirmiştir. E.K. ve M.Ç.Ö. HAD analizlerini gerçekleştirmiştir, E.K. ve Ü.H. sonuçları yorumlamıştır. E.K. makaleyi yazmıştır. E.K. ve M.Ç.Ö. makalenin düzeltmelerini yapmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Zhao HW. Development of a dynamic model of a ducted fan VTOL UAV. PhD, RMIT University, 2009.
- [2] Corva DM, Adams SD, Kouzani AZ. Variable-geometry exit nozzle for improving static thrust of drones ducted fans. *J Field Robot* 2021; 38(8): 1092-1103.
- [3] Abrego AI, Bulaga RW, Rutkowski M. Performance study of a ducted fan system. In: American Helicopter Society Aerodynamics, Acoustics and Test and Evaluation Technical Specialists Meeting; 23-25 January 2002; San Francisco, USA.
- [4] Urban D, Kusmirek S, Socha V, Hanakova L, Hylmar K, Kraus J. Effect of electric ducted fans structural arrangement on their performance characteristics. *Appl Sci* 2023; 13(5): 2787.
- [5] Salazar DM, Liou WW, Xu J. Development of a portable electric ducted fan engine lab for aircraft electric propulsion education. In: AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum; p. 3910, 24-28 August 2020; Virtual conference.
- [6] Yang S. 2009. CN102109418A Simulation test method and simulation test system for unmanned aerial vehicle (UAV) system. Espacenet Patent. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/044173635/publication/CN102109418A?q=CN102109418A> Yayın tarihi Haziran 2011. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [7] Yüzgeç U, Kesler M, Karakuzu C, Türkyılmaz T, Gün AR, Uçar G, Üçgün H, Ökten İ. 2016. İnsansız Hava Aracı Test Düzeneğinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. <https://tinyurl.com/5h4uvsbx> Yayın tarihi Eylül 2016. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [8] Küçüksezer HC, Sancaktar İ. Mikrodenetleyicili İHA uçuş test düzeneği tasarımı. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2021; 8(2): 778-787.
- [9] Baran EA, Hançer C, Çalıkoglu E, Duman E, Çetinsoy E, Ünel M, Akşit MF. 2008. İnsansız hava araçları için test düzeneği tasarımı ve üretimi. <https://tinyurl.com/3jes2rvb> Yayın tarihi Kasım 2008. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [10] ANSYS Fluent. User's Guide. <https://tinyurl.com/mrxcbdnf> Yayın tarihi Temmuz 2021. Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [11] ANSYS Fluent. Theory Guide. <https://tinyurl.com/3tmxvv3t> Yayın tarihi Temmuz 2021. Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [12] Arduino SA: "Arduino". <http://www.arduino.cc/> Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [13] CFD Analizleri için Y+. <https://tinyurl.com/38hkw9hk> Yayın tarihi Ekim 2022. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.

## Zeolit-Bentonit Karışımlarının Farklı Sıcaklıklar Altında Sıkışma İndisinin Hesaplanmasında Ampirik ve Deneysel Yöntemlerin Karşılaştırılması

Esra GÜNERİ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

\*<sup>1</sup> esra.guneri@idu.edu.tr

(Geliş/Received: 01/03/2024;

Kabul/Accepted: 10/09/2024)

**Öz:** Zeminlerin mühendislik özellikleri yapıların tasarım ve uygulama aşamasında oldukça büyük önem arz etmektedir. Eksik ya da hatalı belirlenen parametreler istenmeyen birçok olumsuz sonuca neden olabilmektedir. En önemli mühendislik parametrelerinden biri olan sıkışma indisinin tayini, üzerindeki yapının hasar almaması, sürekliliği ve yeni bir iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaması için en doğru şekilde belirlenmelidir. Sıkışma parametrelerinin belirlenmesinde, konsolidasyon deneyleri kullanılabilirliği gibi literatürde ortaya konan ampirik ilişkilerden de yararlanılabilmektedir. Bu çalışmada zeolit-bentonit ve yosun katkılı karışımların konsolidasyon deneylerinden sıkışma indisi ( $C_c$ ) oda sıcaklığı ve 40°C’de belirlenmiştir. Karışımların ısı değişimlerine karşı mühendislik özelliklerini koruyabilmesi amaçlandığı için deneyler iki farklı sıcaklık koşulunda gerçekleştirilmiştir. Killi zeminler için önerilen iki farklı ampirik ilişkiden yararlanılarak, aynı karışımlar için hesaplamalar yapılmış ve deneysel yöntem sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuçların ampirik ilişkilerle belirlenen farklılık miktarları yüzdesel olarak belirlenerek, formülasyonların doğruluk dereceleri değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Ampirik, bentonit, deneysel, sıkışma, zeolit.

### Comparison of Empirical and Experimental Methods in Calculating the Compression Index of Zeolite-Bentonite Mixtures

**Abstract:** Engineering properties of soils are of great importance in the design and application phase of structures. Incomplete or incorrectly determined parameters can cause many undesirable negative consequences. The correct determination of the compression index, one of the most important engineering parameters, must be determined in the most accurate way to prevent damage to the structure on it, its continuity and the need for a new improvement. Compression parameters can be determined through consolidation experiments, and empirical relationships revealed in the literature can also be used. In this study, the compression index ( $C_c$ ) was determined from the consolidation tests of zeolite-bentonite and seaweed-added mixtures at room temperature and under 40°C. Since it was aimed that the mixtures could preserve their engineering properties against thermal changes, the tests were carried out under two different temperature conditions. Using different empirical relationships suggested for clayey soils, calculations were made for the same mixtures and compared with the experimental method results. The degree of accuracy of the formulations was evaluated by determining the percentage differences of the results from those determined by empirical relations.

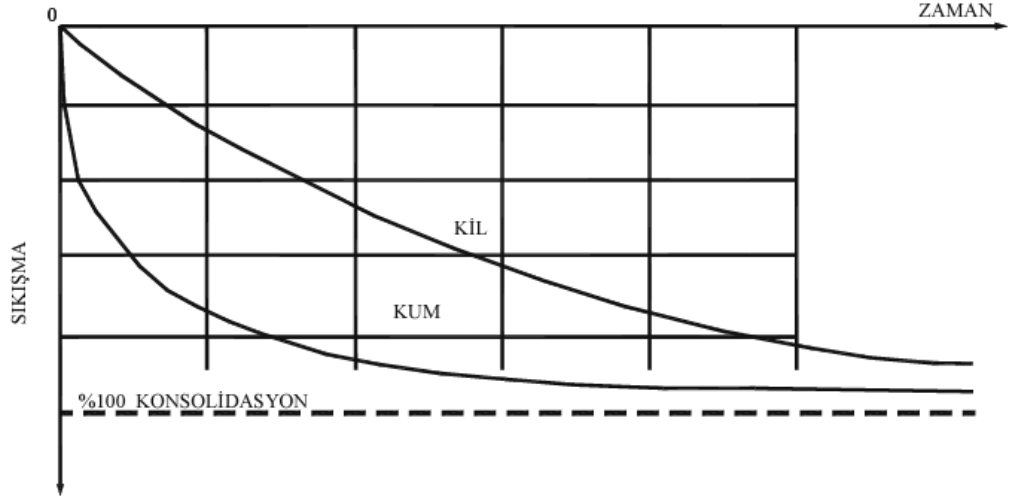
**Key words:** Empirical, bentonite, experimental, compression, zeolite.

#### 1. Giriş

Mühendislik parametrelerinin dizayn aşamasında doğru öngörülmesi ve hesap aşamasında doğru belirlenmesi birçok açıdan önem arz etmektedir. Hidrolik iletkenlik, sıkışma ve kayma dayanımı davranışı ve daha birçok konu inşaat mühendisliği alanında geoteknik açıdan önem taşımaktadır. Zeminlerin sıkışma miktarının belirlenmesi ani ve konsolidasyon oturumlarının toplamına bağlıdır. Ani oturmalar bir anda gerçekleşirken, konsolidasyon oturması iki aşamalı olup birincil ve ikincil olmak üzere ayrılmaktadır ve zamana bağlıdır [1]. Zeminlerin ince ya da iri daneli olmasına bağlı olarak beklenen ve hesaplanan oturma davranışı farklılaşmaktadır. Kumlu zeminlerde ani yani elastik oturma hesaba katılırken (elastik davranış hâkim olmamakla birlikte), killi zeminlerde ise zaman faktörü devreye girerek yüklemenin etkisi ile zeminde oluşan aşırı boşluksuyu basınçlarının sönmülmesi beklenmektedir [1]. Aşırı boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi önemli bir mekanizmadır ve eğer sönmülmezse yapının hasar almasına kısmi ya da genel göçmeye neden olabilmektedir. Aynı zamanda aşırı boşluk suyu basınçları formülse ve mekanizma olarak da efektif gerilmeyi azaltıcı bir parametredir [2]. Zeminlerin sıkışma hızları ve zemin danelerinin yer değiştirerek yeni konumlarına geçmeleri danelerin rijitliği ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 1) [1].

\* Sorumlu yazar: [esra.guneri@idu.edu.tr](mailto:esra.guneri@idu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1840-2118





Şekil 1. Killi ve kumlu zeminler için konsolidasyon-zaman ilişkisi grafiği [3].

Zeminlerin sıkışma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla konsolidasyon deneyinden yararlanılmaktadır. Bu deney kapsamında konsolidasyon hücresi boyutları doğrultusunda zemin numuneleri hazırlanarak numuneler farklı gerilmeler altında sıkışmaya maruz bırakılmaktadır ve sıkışmanın tamamlanmasının ardından üzerindeki gerilme değeri kademeli olarak azaltılarak numunenin şişme davranışı da incelenmektedir. Konsolidasyon deneyinden sıkışma indisi, hacimsel sıkışma katsayısı, konsolidasyon katsayısı gibi parametreler elde edilmektedir. Konsolidasyonda gerçekleşen mekanizma fazla suyun zeminin bünyesindeki boşluklardan dışarı atılması yani drene olması durumunu temsil etmektedir [4]. Literatürde var olan çalışmalar sıcaklık artışı, azalışı ya da döngü barındıran durumlarda zeminlerin sıkışma davranışının değiştiğini göstermiştir. Yüksek sıcaklık altında birincil konsolidasyon fazla suyun boşluklardan dışarı atılmasını ifade ederken, ikincil konsolidasyon danelerin yeniden bir dizilime geçmesi “rearrangement” davranışını temsil etmektedir [4]. Araştırmalar sıcaklık arttıkça genellikle sıkışma miktarının arttığını ortaya koymaktadır. Sıcaklıkla birlikte moleküllerin enerjisinin arttığı, danelerin bu enerjiye bağlı olarak hareketinin arttığı ve zemin daneleri arasındaki bağların zayıfladığı bilinmektedir [5]. Kopan bağlarla birlikte sıkışma miktarı da artış göstermektedir.

Sıkışma parametrelerini belirlemek amacıyla birçok ampirik ilişki ve formüller bulunmaktadır. Zeminin sahip olduğu boşluk oranı, özgül ağırlık, likit limit, plastik limit, iri ya da ince daneli olma özellikleri gibi parametreler yardımıyla konsolidasyon deneyi olmadan sıkışma bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu ilişkiler birçok deney, araştırma ve doğrulama sonucunda kurulmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde likit ve plastik limit, 200 ve 4 No.lu eleklerden geçen yüzdelere, doğal su içeriği, kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı gibi parametreler kullanılarak killi zeminlerin sıkışma indisinin istatistiksel yöntemlerle belirlendiği görülmüştür [6]. Kahraman tarafından yapılan çalışmada ise 560 adet konsolidasyon deney verisi kullanılarak, zemin indeks özelliklerini içeren istatistiksel ilişkiler ortaya konmuştur [7].

Artan dünya nüfusu ve enerji ihtiyacı sıcaklık parametresini incelenecek parametreler arasında en tepeye taşımıştır. Zeminlerin sıcaklık varlığındaki davranışı, dizayn aşamasında belirlenen parametrelerin değişmesine neden olarak, farklılık göstermekte ve önem arz etmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte zeminlerin hacimsel deformasyon, kayma mukavemeti, hidrolik iletkenlik gibi mühendislik özelliklerinde değişiklikler olduğu literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir. Yüksek sıcaklıkların kil üzerindeki hacimsel deformasyon davranışının gerilme geçmişi, mineraloji ve su içeriği gibi birçok farklı faktöre bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir [8]. Literatürdeki çalışmalar oda sıcaklığından 40°C’ye geçildiğinde sıkışma miktarının arttığını göstermektedir. Bu davranış yüksek sıcaklıklarda numunenin yapısının bozulması ve konsolidasyon hızının artmasıyla ilişkilidir [9]. Aynı zamanda artan sıcaklıkla birlikte zemin danelerinin enerjisi ve daneler arasındaki bağların zayıflaması sonucu sıkışma miktarı artmaktadır [4, 5]. Yapılan araştırmalar zeminlerin mühendislik parametrelerinin sıcaklık artışı ve sıcaklık döngüsünden etkilendiğini ortaya koymuştur [10]. Bu sebeple zeminlere ilave edilecek katkı malzemelerinin önemi giderek artmıştır. Isısal değişimlere mukavemeti yüksek, sürdürülebilir ve çevre dostu katkı malzemesi belirlemek oldukça güçtür. Çeşitli cürufur, kimyasallar katkı malzemesi olarak halihazırda kullanılmaktadır. Isısal değişimlere karşı Danimarka gibi soğuk ülkelerde çatı kaplamada kullanılan, denizlerde yetişen, çevreye dost ve bir su bitkisi olan deniz yosunu terminolojik adıyla “Zostera marina” bu çalışma kapsamında katkı malzemesi olarak belirlenmiştir [11].

Katkısız karışım, bentonitin yüksek sıkışma-büzülme potansiyeli ve düşük kayma mukavemeti gibi özelliklerinin nispeten daha iyi mukavemete sahip zeolit ile belli oranda birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Zemin iyileştirmede kullanılacak katkı malzemelerinin çevre dostu, sürdürülebilir olması ve değerlendirilebilen atık malzeme olması önemlidir. Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla bilimsel adı *Zostera marina* olan deniz yosunu kullanılmıştır. *Zostera marina* termal değişimlere karşı dayanıklıdır, soğuk ülkelerde özellikle bina izolasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır ve ülkemizde de izolasyon, dolgu malzemesi, ilaç endüstrisi, ilaç ve oyuncak yapımı gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, deniz yosununun iyileştirici etkisine yüksek sıcaklıklar altında ulaşılması hedeflenmiştir.

Bilindiği üzere, enerji geo-yapıları etrafında kullanılacak tampon malzemelerin bu alanlarda oluşacak yüksek sıcaklığı ortamdaki uzaklaştırılabilmesi için termal açıdan bazı özelliklere (termal iletkenlik, özgül ısı, sıkışma indisi, hidrolik iletkenlik, kendiliğinden sızdırmazlık vs.) sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple bu çalışmada deneyler önce oda sıcaklığı daha sonra 40°C’de gerçekleştirilmiştir. Katı atık depolama alanları, gömülü güç kabloları gibi enerji yapı ve tesisleri etrafında yaklaşık olarak bu sıcaklık değerlerinin oluştuğu bilindiğinden, oluşturulan deniz yosunu katkılı karışımların bu sıcaklıklar değerlerinde performe edilmesi öngörülmüştür [8].

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarına kurutulmuş deniz yosunu katkısı ilave edilerek, oda sıcaklığı ve 40°C’de konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tamamlanması ile konsolidasyon parametreleri belirlenmiştir. Karışımlara ait temel mühendislik parametrelerinden “LL” kullanılarak ampirik bağıntularla sıkışma indisi belirlenmiştir. Sıkışma indisi  $C_c$ ’nin deneylerden ve ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan zeolit, bentonit ve deniz yosunu yerel firmalardan tedarik edilmiştir. Zeolit ve bentonit numunelerine ait özgül ağırlık değerleri sırası ile 2,40 ve 2,70 olarak belirlenmiştir. Zeolit numunesinin oda sıcaklığı altında likit limit değeri %50 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan bentonite ait oda sıcaklığı altında likit ve plastik limit değerleri ise sırası ile %476 ve %70 olarak bulunmuştur. Deniz yosunu, kurutulmuş halde temin edilmiştir. Katkısız karışımdaki zeolit oranı %60 seçilirken, bentonit oranı %40 olacak şekilde kullanılmıştır. Karışımlardaki yosun katkısı oranı ise %10 ve %20 olarak tercih edilmiştir. Islak haldeki karışıma ait görsel Şekil 2’de verilmiştir.

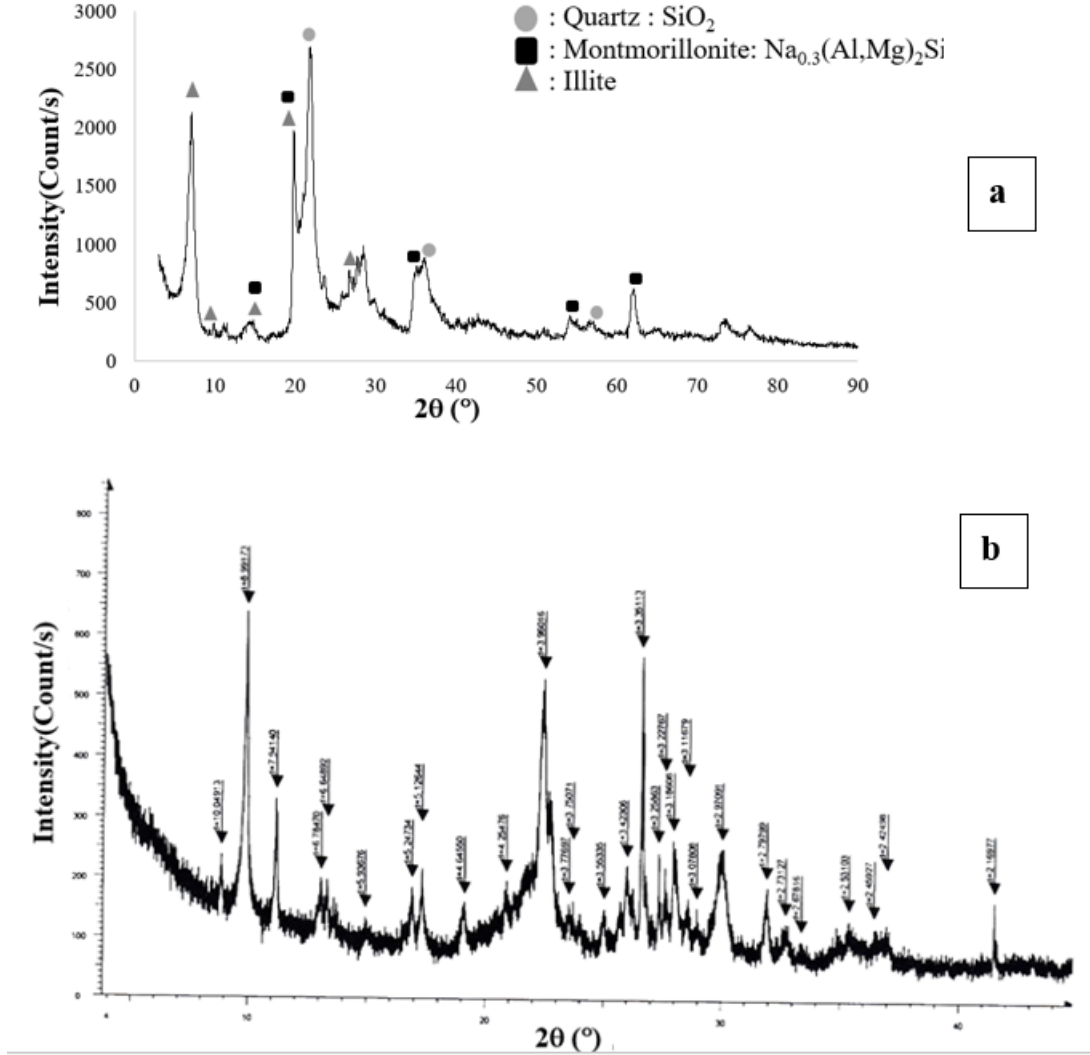
**Tablo 1.** Malzemelere ait fiziko-kimyasal özellikler.

Özellik	Zeolit	Bentonit
Özgül ağırlık	2,40	2,70
Likit limit (%)	50,0	476,0
Plastik limit (%)	N.P.	70,1
pH	7,6	9,5



**Şekil 2.** Kurutulmuş yosun katkılı ıslak zeolit-bentonit karışımı.

Tablo 1’de zeolit ve bentonite ait özellikler verilmiştir. Deneylerde kullanılan bentonit Na-bentonittir. Deniz yosunu habitatu su olan, su altı yaprak uzunluğu en fazla 1100 mm olan ve su altı yaprak genişliği 2-12 mm arasında değişen bir bitkidir [11].



Şekil 3. a) Bentonit ve b) zeolit numunesine ait XRD analiz sonucu.

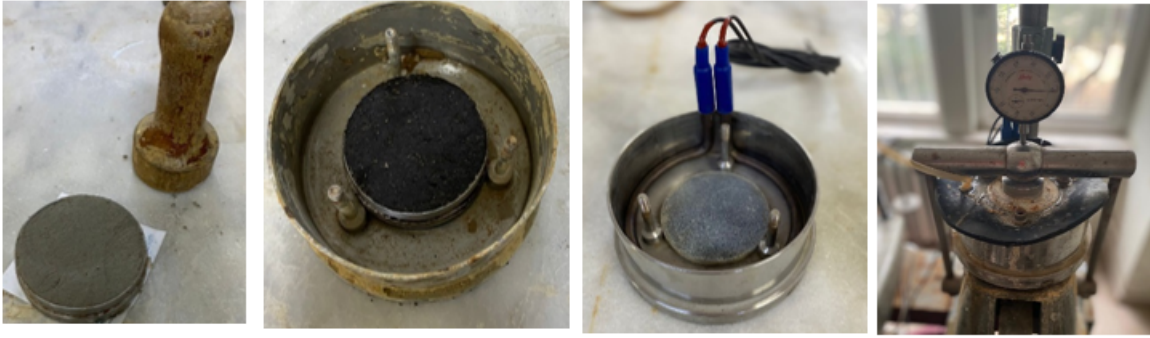
X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, Thermo Scientific ARL X’TRA ekipmanı ile 0,1° 2θ/s tarama hızı ve 60 kV, 5-60 mA radyasyonla 0° ila 89° odaklama geometrisinde gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kullanılan harflendirmelerde “B” bentoniti, “Z” zeoliti ve “Y” kurutulmuş deniz yosununu temsil etmektedir. XRD analizi sonucunda bentonit numunesinin ise illit, montmorillonit ve kuvars minerallerini içerdiği görülmüştür (Şekil 3a). Zeolitin içerisinde ise klinoptilolit, kuvars, feldispat ve illit-mikanın bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 3b).

## 2.2. Yöntemler

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (40°C) altında konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneye tabi tutulacak numunelerin önce kompaksiyon deneyleri [12] gerçekleştirilerek  $w_{opt}$  ve  $V_{d,max}$  parametreleri elde edilmiştir. Böylece zeminin sıkıştırılması sağlanarak zemin boşluklarındaki havanın dışarı atılması, zeminin kayma mukavemetinin artırılması, permeabilitesinin azaltılması ve sıkışabilirliğinin azaltılması gibi etkiler sağlanmış olmaktadır. Belirlenen parametrelere göre numuneler

hazırlanarak önce oda sıcaklığı, daha sonra 40°C sıcaklık altında deneyler yürütülmüştür. Deneylerde karışımlar oluşturulurken malzemeler kuru halde tartılmış olup, ilk olarak toplam kuru ağırlığın %10 ve %20'si katkı malzemesi olacak şekilde eklenmiştir. Kalan ağırlığın %40' ı bentonit numunesi ve geriye kalan miktar ise zeolit olarak belirlenmiştir. Karışımlar optimum su içeriği değerine göre püskürtme metodu ile ıslatılarak, önce kuru halde olmak koşulu ile karıştırılarak oluşturulmuştur.

Oda sıcaklığı altında (22~24°C) gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri ASTM D2435'e göre yapılmıştır [13]. Yüksek sıcaklık olarak tanımlanan "40°C" sıcaklık altındaki deneylerde ise numunelerin ısıtılması amacı ile hücre içerisine yerleştirilen ısı halkasından yararlanılmıştır. Isıtmanın sağlanmasının ardından sıcaklığın 40°C'ye sabitlenmesi için termostat kullanılmıştır. Deneyler sıcaklık varlığında başlatılıp, aynı sıcaklıkta sonlandırılmıştır. Her iki sıcaklık koşulu altında da yüklemeler gerçekleştirilip, deformasyonlar tamamlandıktan sonra boşaltma aşamasına geçilerek karışımların şişme değerleri de elde edilmiştir. Şekil 4'te sıkıştırma işlemi sonrasında konsolidasyon hücresine yerleştirilmiş yosun katkılı karışıma ait görsel verilmiştir. Deneylerin son bulmasının ardından numuneler etüve bırakılarak, sonuçlar sıkışma parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamıştır.



Şekil 4. Sıkıştırılmış karışımlar ve 40°C'de kullanılan konsolidasyon deney ekipmanları.

Çalışmanın ampirik bağıntılardan yararlanılan bölümünde Tablo 2'de verilen formülasyonlardan yararlanılmıştır. Killi zeminler için önerilen ve bünyesinde likit limit parametresi barındıran bu formülasyonlar her bir karışım için oda sıcaklığı ve 40°C sıcaklık altında sıkışma indisinin ( $C_c$ ) belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. Formüllerde kullanılan likit limit değerleri karışımların oda sıcaklığı ve 40°C'deki değerleridir. Numuneler etüve 40°C'de 24 saat süre boyunca tutulduktan sonra likit limit deneyleri tekrarlanarak yeni sonuçlara ulaşılmıştır. Likit limit deneyleri gerçekleştirilirken, numunelerde oluşabilecek nem kaybının en aza indirilmesi açısından ortam sıcaklığının 22° ile 24°C arasında olmasına özen gösterilmiştir. Terzaghi-Peck (1967), sıkışma indisinin belirlenmesi amacı ile örselenmiş killer için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir [14]. Örselenmemiş numuneler için ise 0,007 katsayısının yerine 0,009 kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. EM1110-1-1904 [15] ise kullanılan bir diğer ampirik formüldür.

Tablo 2. Sıkışma indislerinin ( $C_c$ ) belirlenmesinde kullanılan ampirik bağıntılar.

Referans	Sıkışma İndisi
Terzaghi-Peck (1967) [14]	$C_c = 0,007 \times (LL - 10)$
EM1110-1-1904 [15]	$C_c = 0,01 \times (LL - 13)$

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Kompaksiyon deney sonuçları göstermiştir ki; katkısız karışımın  $w_{opt}$  değeri %53 iken, bu değerler %10 ve %20 deniz yosunu katkısı ile sırasıyla %55 ve %60 değerine yükselmiştir. Katkısız zeolit-bentonit karışımında maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 9,9 kN/m<sup>3</sup> iken %10 ve %20 deniz yosunu katkısı ile bu değerler sırasıyla 9,6 ve 9,4 kN/m<sup>3</sup>'e düşmüştür.

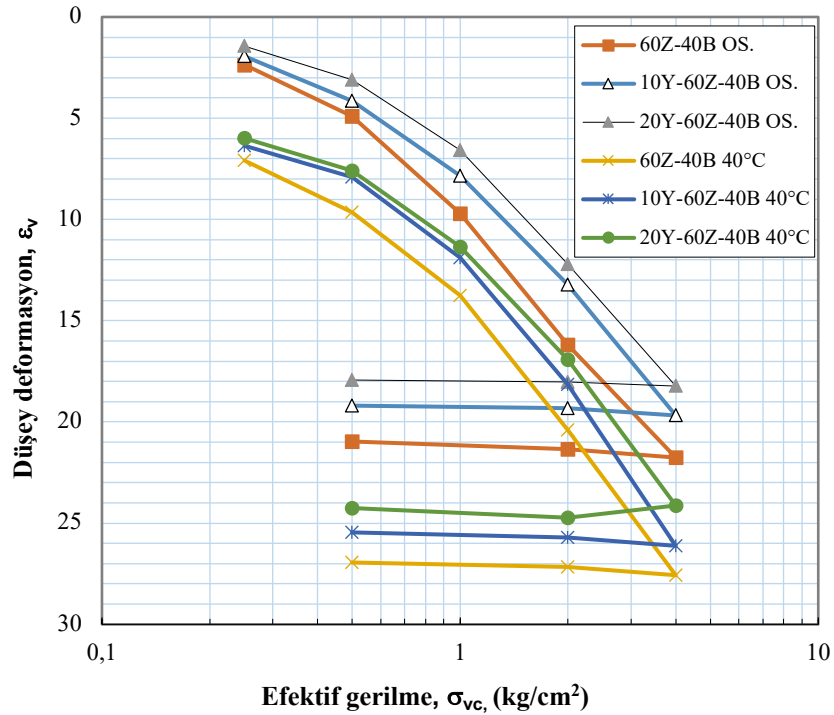
Bu çalışmada, katkısız ve kurutulmuş deniz yosunu katkılı zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve 40°C'de likit limit ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sıkışma indisi  $C_c$ , likit limit parametresini içeren ampirik bağıntılar kullanılarak ayrıca belirlenmiştir. Ampirik formüller kullanılırken,

likit limit değerlerinin doğru temsili açısından her sıcaklık koşulu için istenilen veriler o koşullar altında elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konmuştur.

Likit ve plastik limitler zeminlerin mühendislik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmayı ve zeminin farklı evreleri arasında geçişi sağlayan parametrelerdir [16]. Farklı sıcaklık değerlerinde (15~35°C ve 6~35°C) yapılan deneylerde plastik limit ( $w_p$ ) değerinin düştüğü gözlenirken [17, 18], 2~41°C arasında yapılan başka bir çalışmada da düzensiz bir trend olduğu gözlenmiştir [19]. Bu bulguların aksine kaolin örneğinin  $w_L$  değerinin yüksek sıcaklıklarda arttığı gösterilmiştir [20].

**Tablo 3.** Oda sıcaklığı ve 40°C’de belirlenen likit limit değerleri.

	Oda Sic.	40°C
Karışım	LL (%)	LL (%)
60Z-40B	180	215
60Z-40B-10Y	194	253
60Z-40B-20Y	200	266



**Şekil 5.** Karışımlara ait oda sıcaklığı (OS) ve 40°C’de sıkışma eğrileri.

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının katkılı ve katkısız halde yapılan likit limit belirleme çalışmaları sonucunda sıcaklık artışı ile likit limit değerlerinin, zeminlerin yapısının birbirinden farklı olması ve killi zeminlerin su tutma kapasitesinin daha yüksek olması, spesifik yüzey alanının sıcaklık değişimleriyle değişmesi gibi etkenlerle değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tablo 3’de verilen farklı sıcaklık koşullarına maruz bırakılan numunelerin likit limit değerlerinin sıcaklıkla beraber arttığı görülmüştür. Daha büyük yüzey alanına sahip bir kil mineralinin, daha küçük bir yüzeye göre daha fazla su tutması mümkündür ve bu sebeple sıcaklık artışından da yüzey daha fazla etkilenecektir [21]. Ayrıca ortaya çıkan farklılıkta zemin mineralojisinin etkisi de

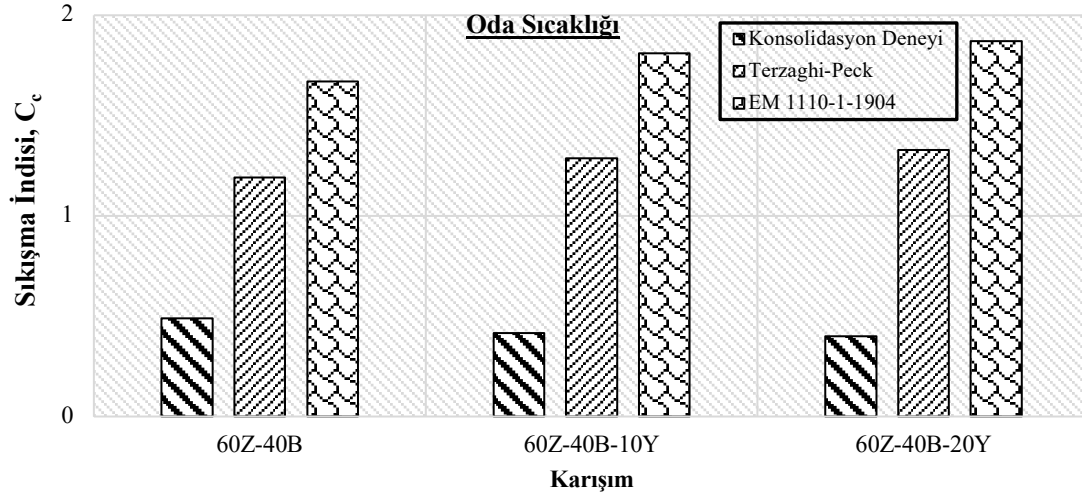
göz ardı edilemez. Bentonit gibi yüksek dereceli tiksotropik bir kil, daha yüksek bir sıcaklıkta pıhtılaşabilir ve dolayısıyla artan bir likit limit değeri gösterebilir. Spesifik yüzey alanı (SSA) ve zemin mineralojisi gibi farklı faktörler, sıcaklık varlığında kıvam limitlerini değiştirir, viskoziteyi ve hidrolik iletkenliği de etkiler [17].

Şekil 5'te deniz yosunu katkılı zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve 40°C'de sıkışma eğrileri verilmiştir. Deniz yosunu katkısının, her iki sıcaklık koşulu altında da katkısız karışımın sıkışma miktarını azaltıcı etkide bulunduğu görülmektedir. 40°C'deki numunelerin, oda sıcaklığındaki numunelerle kıyaslandığında, sıkışma miktarının daha fazla olması artan sıcaklıkla birlikte sıkışma miktarının artmasından kaynaklanmaktadır ve literatürle paralellik göstermektedir [8].

**Tablo 4.** Ampirik ilişkiler ve deneysel yöntemlerle hesaplanan sıkışma indisleri ( $C_c$ ).

Karışım	Sıkışma İndisi, $C_c$ (Oda Sıc.)			Sıkışma İndisi, $C_c$ (40°C)		
	Deneysel	Terzaghi-Peck [10]	EM 1110-1-1904 [11]	Deneysel	Terzaghi-Peck [10]	EM 1110-1-1904 [11]
60Z-40B	0,48	1,19	1,67	0,65	1,43	2,02
60Z-40B-10Y	0,41	1,28	1,81	0,62	1,70	2,40
60Z-40B-20Y	0,40	1,33	1,87	0,61	1,79	2,53

Terzaghi-Peck (1967) [14] ve EM1110-1-1904 [15] tarafından önerilen ampirik sıkışma formülleri sonucunda 60Z-40B karışımı için oda sıcaklığı altında konsolidasyon deneyinden elde edilen sonuçlara kıyasla, sırasıyla yaklaşık 2,4 ve 3,4 kat daha yüksek sıkışma miktarı elde edilmiştir. %10 ve %20 kurutulmuş deniz yosunu katkısı ile bu oranların yaklaşık 3~4 kat arttığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık (40°C) altında ise 60Z-40B karışımı için oturma miktarı deneysel verilere kıyasla 2~3 kat artış göstermiştir. Yüzdesele ifade etmek gerekirse 60Z-40B karışımının deneysel yöntemle 0,488 olarak belirlenen  $C_c$  değeri %40 sapma göstererek 1,19 değerine ulaşmıştır (Şekil 6). Konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar yosun katkısının sıkışmayı azaltıcı etkiye sahip olduğunu ortaya koyarken, ampirik ilişkiler içerisinde likit limit (LL) parametresi barındırdığından ve sıcaklık artışı gerçekleştiğinde numunelerin likit limit değerlerinde artış gerçekleştiğinden dolayı katkılı karışımların sıkışmayı arttırıcı bir etkide bulunduğunu göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan ampirik formüller örselenmiş killi zeminler için önerilmiş olup, deneylerde kullanılan numunelerin kil içeriğinin (%40 bentonit) yüksek olmasına rağmen, farklı zemin tipi ve katkı malzemesi de içermesinden dolayı elde edilecek sonuçların farklılaşmasına etken olmuştur. Ampirik formüllerin birçok deneme ve tecrübe sonucunda elde edildiği bilinirken, konsolidasyon deneyini gerçekleştirmenin bir ölçme olduğu ve numune bazında sonuç belirlenmenin daima mühendislik açısından daha elzem olduğu görülmektedir. Görülmektedir ki; bu çalışma kapsamında kullanılan ampirik bağıntılar, yüksek hata payı ile sadece oda sıcaklığını temsil edebilmektedir.



Şekil 6. Oda sıcaklığı altında  $C_c$ 'nin değişimi.

Deniz yosununun sürdürülebilir, çevre dostu ve hali hazırda doğada yetişen bir su bitkisi olması sebebi ile temini kolay ve maliyeti düşük olmaktadır. Katkı oranlarının gelecekteki çalışmalarda artırılması ile birlikte, ekonomik açıdan daha da uygun bir hal alabilecektir. Deniz yosununa göre nispeten daha maliyetli ancak karışım bazında kullanılması uygun olan ve bu çalışmada kullanılan zeolit ve bentonitin de katkı ile birlikte kullanımı ekonomik açıdan çalışmayı destekleyici niteliktedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneylerde, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarından yararlanılmıştır. Yazar, bu destek için minnettardır. Bu çalışmada E.G., fikir sahibi olup deneyleri gerçekleştirmiş, sonuçları yorumlamış ve makaleyi yazmıştır.

#### Kaynaklar

- [1] Yüksel B. Konsolidasyon Süresince Kil Yapısındaki Değişimin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [2] Çinicioğlu SF. Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı. İMO İstanbul 19.02.2005.
- [3] Cernica JN. Geotechnical Engineering. Soil Mechanics, 1995. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [4] Jarad N. Temperature impact on the consolidation and creep behaviour of compacted clayey soils. Mechanics of materials [physics.class-ph]. Université de Lorraine. 2016. English. NNT :2016LORR0251.
- [5] Gupta B. Creep of saturated soil at different temperatures. Master Thesis, The University of British Columbia, Canada. 1964.
- [6] Orhan M, Işık NS, Özer M, Toprak B. Killi Zeminlerin Sıkışma İndisinin İstatistiksel Yöntemlerle ve Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmin Edilmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 2236-2241, 13-15 Mayıs 2009.
- [7] Kahraman E. Konsolidasyon Özelliklerinin Arttırılmış Veri Seti İle İstatistiksel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [8] Cekerevac C and Laloui L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. Int J Numer Anal Meth Geomech, 28: 209-228, 2004.
- [9] Towhata I, Kuntiwattanaku P, Seko I and Ohishi K. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. Soils Found, 1993.
- [10] Laloui L. Thermo-mechanical behavior of soils. Revue Française de Genie Civil.,5(6), 809-843, 2001.
- [11] Delaney A, Frangoudes K and Ii SA. Society and Seaweed Understanding the Past and Present. 2016.
- [12] ASTM: D698-12. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-13, 2012.
- [13] ASTM D2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [14] Terzaghi K and Peck RB. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley, New York, 1967.
- [15] Department Of the Army. EM 1110-1-1904. U.S. Army Corps of Engineers. CEMP-ES. Washington, DC 20314-1000. Engineer Manual. No. 1110-1-1904.

- [16] Atterberg A. Die Plastizität der Tone, Internationale Mitteilungen für Bodenkunde 1911, 1, 10–43.
- [17] Youssef MS, Sabry A, Ramli AH. EI. Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. in: Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, pp. 419-421, 1961.
- [18] Ctori P. The effects of temperature on the physical properties of cohesive soils. Ground Engineering, 22 (5), 26-27. 1989.
- [19] Laguros JG. Effect of temperature on some engineering properties of clay soils Highway Res. Board Spec. Rep., 103 pp.186-193. 1969.
- [20] Tippet T. An investigation into the effect of temperature upon the Atterberg Limits and mechanical properties of cohesive soils. Undergraduate Project Report, Lanchester Polytechnic, Coventry.1976.
- [21] Jefferson I and Rogers CDF. Liquid limit and the temperature sensitivity of clays, Engineering Geology, Volume 49, Issue 2, 1998, Pages 95-109, ISSN 0013-7952.





## Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı, Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi

Sefa KIZIRGİL SARI<sup>1</sup>, Ayça GÜLTEN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>kzrgls@gmail.com, <sup>2</sup>aaytac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/03/2024;

Kabul/Accepted: 27/07/2024)

**Öz:** Enerjinin korunumu ve enerji tasarrufu konusu son yıllarda ülkemizde ve dünyada büyük önem kazanmıştır. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerjinin özellikle tüketimde büyük payı olan binalar tarafından daha az kullanılması hedeflenmektedir. Yalıtım uygulamaları, özellikle ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasında ekonomik ve çevresel etkiyi azaltan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Optimum yalıtım kalınlığı uygulamaları ise hem yalıtım ve yakıt maliyetini optimize eden, hem de yakıt emisyonlarının çevresel etkisini azaltmak üzerinde olumlu etkileri olan bir yöntem olarak son yıllarda sıklıkla çalışmalara konu olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il (Ağrı, Ardahan, Erzincan, Yozgat, Bayburt) için, üç farklı duvar türü (gazbeton, tuğla ve betonarme) ve dört farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü) dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlığı hesabı yapılmıştır. Buna göre sağlanan enerji tasarruflarının ve yakıt emisyonlarının sayısal olarak sunulması, bu iller ve iklim bölgesi için hangi duvar türü ve yalıtım malzemelerinin birlikte kullanımının daha iyi sonuç vereceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen optimum yalıtım kalınlıkları için yoğuşma kontrolü yapılmış olup, yalıtımın içten uygulanmak zorunda kalındığı durumlar özelinde yalıtım malzemeleri ve duvar türleri üzerinden analizler yapılmıştır. En iyi sonuç, her il için aynı olup dıştan yalıtımlı gazbeton duvar malzemesinin, doğal gaz yakıtının ve EPS yalıtım malzemesinin kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu, çevresel etki, yoğuşma kontrolü.

### Optimum Insulation Thickness, Environmental Impact and Condensation Analysis for Cold Climate Regions of Turkey

**Abstract:** The issue of energy conservation and energy saving has gained great importance in our country and the world in recent years. For this purpose, it is aimed to increase the use of renewable energy sources and to reduce the use of energy, especially by buildings, which have a large share in consumption. Insulation applications appear as a method that reduces the economic and environmental impact, especially in reducing the need for heating energy. Optimum insulation thickness applications have been the subject of frequent studies in recent years as a method that both optimizes insulation and fuel costs and has positive effects on reducing the environmental impact of fuel emissions. The purpose of this study; To minimize heat losses in the provinces in the cold climate regions of our country, to ensure the optimization of the insulation material and thickness to be used in the buildings and to evaluate the environmental effects of these applications. In this study in accordance with these purposes, using LCC method Turkey located in cold climatic regions 5 provinces for externally and internally insulated gas concrete, brick, reinforced concrete wall two different types of fuel of which wall model used (natural gas, coal) and four different insulation materials (XPS, EPS, glass wool, rock wool) calculated for were optimum insulation thicknesses, energy savings, payback times and CO<sub>2</sub> emissions. It was observed that a significant amount of energy was saved by applying insulation with optimum thickness. It was tried to find the ideal system by condensation control. The best result for each province is obtained when natural gas fuel and EPS insulation material are used in the externally insulated aerated concrete wall model.

**Key words:** Optimum insulation thickness, energy saving, environmental impact, condensation control.

#### 1.Giriş

Son yıllarda yenilenemez enerji kaynaklarının gittikçe azalması ve enerji tüketiminin neden olduğu çevre kirliliği, enerji korunumunun önemini artırmıştır [1]. Dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %40'ı binalar tarafından kullanılmaktadır. Binalar tarafından ısıtma, soğutma, aydınlatma vb. gereksinimler için tüketilen enerji miktarının azaltılabilmesi, enerji korunumu ve dolayısı ile sürdürülebilirliğe katkı sağlamak açısından önemlidir [2]. Isıtma ihtiyacı için kullanılan enerji miktarı toplam enerji tüketiminde büyük paya sahiptir [3]. Binalarda yalıtım uygulamaları, ısıtma ihtiyacı için kullanılan enerjinin azaltılması ve geri kazanılması açısından oldukça önemlidir [4]. Yalıtım malzemesinin optimum kalınlıkta uygulanması hem ekonomik hem de çevresel etki açısından enerji verimliliğini olumlu etkilemektedir. Bu nedenle ısı yalıtımı, kullanılacak yalıtım malzemesinin yanı sıra, ekonomik veriler, yakıt türü, duvar kabuğu bileşenleri gibi başka kriterlerle birlikte düşünülmelidir [5]. Isı yalıtımı

\* Sorumlu yazar: [aaytac@firat.edu.tr](mailto:aaytac@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0003-4250-2677, <sup>2</sup> 0000-0001-9837-8674

olmayan veya yeterli yalıtımın uygulanmadığı binalarda ısıtma ihtiyacı için daha fazla yakıt tüketimi gerçekleşmekte ve dolayısı ile daha fazla yakıt emisyonu oluşmaktadır. Bunun yanı sıra yalıtım kalınlığının gereğinden fazla uygulanması, enerji tüketimi üzerinde olumlu bir etkiye sebep olmayıp, yalıtım maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle binanın bulunduğu iklim bölgesine göre belirlenen optimum yalıtım kalınlığının uygulanması hem yalıtım maliyeti hem de enerji ve yakıt tüketimi açısından ekonomik bir avantaj sağlarken, yakıt tüketiminin neden olduğu yakıt emisyonu ve çevresel etki de azaltılabilecektir [6]. Literatürde optimum yalıtım kalınlığı üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Aytaç ve Aksoy [7] yaptıkları çalışmada dıştan yalıtımlı ve sandviç olmak üzere iki farklı duvar tipi için optimum yalıtım kalınlığı hesaplaması yapmıştır. Elazığ ili için yapılan hesaplamalarda, kömür, doğalgaz, fuel oil, LPG, elektrik olmak üzere beş farklı yakıt türü ve geliştirilmiş polistren ile taşıyıcı olmak üzere iki farklı yalıtım malzemesi dikkate alınmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının uygulanmasıyla önemli enerji tasarruflarının elde edildiği belirtilmiştir. Çalışmada en iyi sonucun dıştan yalıtımlı duvar için, yakıt olarak kömür ve yalıtım malzemesi olarak da geliştirilmiş polistren kullanıldığında elde edilmiştir. Bolattürk ve Dağdır [8], Türkiye'nin sıcak iklim bölgesinde yer alan Adana, Antakya, Antalya, Aydın, İzmir ve Mersin illeri için hem ısıtma hem de soğutma derece gün sayılarını ve güneş radyasyonunu dikkate alarak optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Hesaplamalarda p1-p2 ekonomik yöntemi kullanılmış olup, enerji tasarrufu, geri ödeme süresi verileri de sunulmuştur. Güneş radyasyonun hesaplamalara dahil edildiği ve edilmediği durumlar için optimum yalıtım kalınlıkları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak TS 825'e göre birinci bölgede yer alan iller için belirlenen U değerlerinin yetersiz olduğu belirtilmiştir. Kürekçi ve ark. [9], Türkiye'de yer alan 81 il için ömür maliyet analizi yöntemini kullanarak optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Dıştan yalıtımlı duvar türünün dikkate alındığı çalışmada, iki farklı yakıt türü (doğal gaz, kömür) ve beş farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS, poliüretan) için optimum yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları hesaplanmıştır. Bektaş [10], TS 825 ve ömür maliyet analizi yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemi kullanarak, Ankara'da bulunan bir bina için optimum yalıtım kalınlığı hesaplaması yapmıştır. Beş farklı yalıtım malzemesi, gazbeton ve tuğla duvar olmak üzere iki farklı duvar türü için yapılan hesaplamalarda bulunan değerler birbirinden farklı olmuştur. TS 825 standardında binada oluşan tüm ısı kayıpları dikkate alındığı için ömür maliyet analizi yöntemine göre daha sağlıklı bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Yıldız ve ark. [11], İzmir ve Ankara illerinde derece gün metodu yöntemini kullanarak, ekonomik analiz, malzeme ömrü analizi yaparak ısı yalıtım malzemesi olan cam yünü ve taş yününün optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Farklı yöntemlerle bulunan değerlerin birbirleriyle örtüşmediği görülmüştür. Bu değerler için çevresel analiz de yapılmıştır. Yalıtım malzemelerinin ekonomik analizi farklı yakıt türleri için değerlendirilmiş ve çevresel etkiler göz önüne alındığında yalıtımın her durum için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Kürekçi ve Erdem [12], ömür maliyet analizini kullanarak 4 il (Antalya, Bursa, Ankara, Van) için dıştan yalıtımlı duvar modelinde doğal gaz yakıtı ve beş farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS, poliüretan) için optimum yalıtım kalınlığını, geri ödeme sürelerini ve yıllık tasarruf miktarlarını hesaplamıştır. Isıtma ve soğutma derece gün değeri üç ayrı yöntemle hesaplanmış, derece gün değerinin optimum yalıtım kalınlığı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gürel ve Cingiz [13] yalıtım uygulamalarında en fazla kazancı elde edildiği optimum noktayı bulmak için yatay delikli duvarlardan gerçekleşen ısı kayıplarını belirlemiştir. Ömür maliyet analizine (LCCA) göre ısı yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları belirlenmiştir. Gürel ve ark. [14] Karabük'te kömür ve doğal gaz kullanımında dış duvar optimum yalıtım kalınlığının ekonomik ve çevresel analizini yapmıştır. Yöntem olarak yaşam döngüsü maliyet analizine (LCCA) dayanan P1-P2 yöntemi kullanılmıştır. Doğal gaz kullanılan binalarda daha az yalıtım kalınlığı gerektiği ve enerji tasarrufunun daha az olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığı noktasında hava kirliliğinin en az olduğu görülmüştür. Cerit ve Yılmaz [15], Antalya'da tuğla duvar yapılarının ısı davranışlarını dış ortam koşullarında araştırmış, standart bir binayı parçalara bölerek ısı yalıtımı açısından değerlendirmiş ve her parçanın asgari standartlarını belirlemiştir. Enerji tasarrufuna etki eden güneş ışınımları, iç ve dış yüzey sıcaklıkları düzenli olarak ölçülerek enerji tüketimi ile çevre kirliliği arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Çamur [16], EPS ve taş yünü ısı yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerini GaBi 4 yazılımını kullanarak değerlendirmiştir. Çevresel etkilerin en çok üretim evresinde olduğu ve EPS'nin taş yününe göre daha çevre dostu bir ürün olduğu ortaya koyulmuştur. Kaya ve Türkeri [17] Marmara Bölgesi'nde üretilen dış duvar sistemlerinin (duvar çekirdeği, su yalıtımı, ısı yalıtımı ve kaplama malzemeleri) çevresel performanslarını değerlendirmiştir. Bu amaçla, YDD standardına bağlı bir anket çalışması hazırlanmıştır. Marmara Bölgesi'nde üretilen ilgili yapı malzemeleri ve üretici firmalar belirlenerek on yedi firmaya anket çalışması uygulanmıştır. Değerlendirme sonucunda klinker kaplama gibi sadece üretim enerjisi eksik malzemelere ek olarak polisülfid esaslı su yalıtım sıvısı, EPS ve metal levhalar gibi bazı malzemelerin hammadde, doğal kaynak tüketimleri ve üretim enerjileri hakkında yeterli bilgiye ulaşılamamıştır. Eksik bilgilerle gerçek performansları belirlenemeyen malzemeler karşılaştırılamamıştır. Evin ve Uçar [18], duvar, döşeme gibi yapı elemanları için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hem ısıtma hem de soğutma derece gün sayısını dikkate alarak hesaplamıştır. Çalışmada elde edilen değerlerle küresel ısınma potansiyeli, yaşam döngüsü ve eko verimlilik analizleri yapılmıştır. Dylewski ve Adamczyk [19] ısıtma maliyetinin ekonomik ve ekolojik özelliklerini incelemiştir. Optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken ekonomik özelliklerin yanında ekolojik özelliklerin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Yaşam döngüsü analizi yapılırken (LCA) yalıtım malzemelerinin ve ısıtma enerjisi kaynaklarının çevreye olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan tüm analizler sonucunda ekolojik sebeplerin ekonomik sebeplerden çok daha önemli olduğu ve yatırımların ekolojik bakış açısına göre yapılması gerektiği belirlenmiştir. Kürekçi ve Özcan [20] sıcak su sistemlerinde yakıt, yalıtım ve toplam maliyet üzerinde çalışmalar yapmıştır. Sıcak su borularına uygulanan yalıtım sistemlerinde optimum yalıtım kalınlığının toplam maliyet üzerine olan etkisi incelenmiştir. Matematiksel modele dayalı ampirik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde farklı yalıtım malzemeleri, boru ve yakıt türleri kullanılarak denemeler yapılmıştır. Çapları aynı olan boruların optimum yalıtım kalınlıkları aynı değerlerde bulunmuş ve çapı büyük olan boruların sağladığı enerji tasarruf miktarları daha fazla olmuştur. Çelik, bakır ve plastik boruların kullanılmasıyla ısı kayıplarının azaltılabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Fuel oil'in diğer yakıtlara göre daha ekonomik olduğu görülmüştür. Dombaycı ve ark. [21] Denizli ilinde beş farklı yakıt türü (kömür, doğal gaz, LPG, akaryakıt, elektrik) ve iki farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, EPS) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Enerji tasarrufu açısından en uygun koşul yakıt olarak kömür, yalıtım malzemesi olarak EPS kullanıldığında elde edilmiştir. Optimum yalıtım kalınlıklarının uygulanmasıyla enerji tasarrufu miktarı 14,09 \$/m<sup>2</sup> ve geri ödeme süresi 1,43 yıl olarak tespit edilmiştir. Yu ve ark. [22] Çin'de sıcak ve soğuk iklim bölgelerinde bulunan 4 ilde beş farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, PUR, perlit, polivinil klorür) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Optimum yalıtım kalınlığı değerlerinin 5,3 – 23,6 cm arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda en ekonomik yalıtım malzemesinin EPS olduğu tespit edilmiştir. Mishra ve ark. [23] Hindistan'da üç farklı duvar malzemesi (taş, tuğla, beton), iki farklı yalıtım malzemesi (cam yünü, XPS) ve beş farklı yakıt türü (kömür, doğal gaz, LPG, akaryakıt, elektrik) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Optimum yalıtım kalınlığı değerleri 3,14 – 8,47 cm arasında değişmiştir. Isıtma yükleri, derece-gün yöntemi kullanılarak enerji tasarrufu miktarları hesaplanmıştır. Sancaktar [24] eski bir bina üzerinde yalıtım iyileştirmesi yapılarak elde edilen enerji tasarrufunu göstermiştir. Doğal gaz ile ısıtılan binaya 3 cm, 4 cm ve 5 cm'lik EPS malzemesi kullanılarak yalıtım uygulaması yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda yalıtım kalınlığının yalnızca 5 cm uygulandığı durumda TS 825 verilerine yaklaşıldığı tespit edilmiştir. Bu verilere göre analizler, maliyet hesapları yapılmış ve yapılan iyileştirmeler sonucunda %56,8 oranında bir performans artışı olmuştur. Yılmaz [25] 3. iklim bölgesinde bulunan Konya, 4. iklim bölgesinde bulunan Erzincan ilinden on apartman seçerek ısı yalıtım analizi yapmıştır. Bu çalışmada apartmanlara XPS ve EPS malzemeleri ile yalıtım yapılmıştır. Bu uygulamalar ile %62 oranında enerji tasarrufu sağlandığı ve bu illerde yalıtım kalınlığının minimum 6 cm olması gerektiği tespit edilmiştir. Literatürde bazı çalışmalarda farklı iklim bölgeleri için kıyaslamalar yapılırken, bazı çalışmalarda ise sadece sıcak iklim bölgeleri için soğutma yükü üzerinden optimum yalıtım kalınlığı değerleri hesaplanmış ve maliyet analizleri yapılmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının kullanılmasıyla sağlanan enerji ve yakıt tasarrufu ile buna bağlı olarak düşürülen yakıt emisyonlarının analiz edildiği, çevresel etkinin ve yoğunlaşma faktörünün değerlendirildiği çalışma sayısı oldukça azdır. TS 825'e göre Türkiye'nin en soğuk bölgeleri olan 4. ve 5. Derece gün bölgesinde yer alan iller, Türkiye'de ısıtma ihtiyacının en fazla ve uzun süreli olduğu yerlerdir. Bu nedenle bu bölge için yapılarda optimum yalıtım kalınlığının farklı yapı malzemeleri ve duvar yapı bileşenleri için belirlenmesi hem yalıtım ve toplam maliyet değerlerinin düşmesi hem de yakıt tüketiminin ve buna bağlı olarak yakıt emisyonlarının azalması açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il (Ağrı, Ardahan, Erzincan, Yozgat, Bayburt) için, üç farklı duvar türü (gaz beton, tuğla ve betonarme) ve dört farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü) dikkate alınarak iki farklı yakıt türü için optimum yalıtım kalınlığı hesabı yapılmıştır. Buna göre sağlanan enerji tasarruflarının ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının sayısal olarak sunulması, bu iller ve iklim bölgesi için hangi duvar türü ve yalıtım malzemelerinin birlikte kullanımının daha iyi sonuç vereceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen optimum yalıtım kalınlıkları için yoğunlaşma kontrolü yapılmış olup, yalıtımın içten uygulanmak zorunda kalındığı durumlar özelinde yalıtım malzemeleri ve duvar türleri üzerinden analizler yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

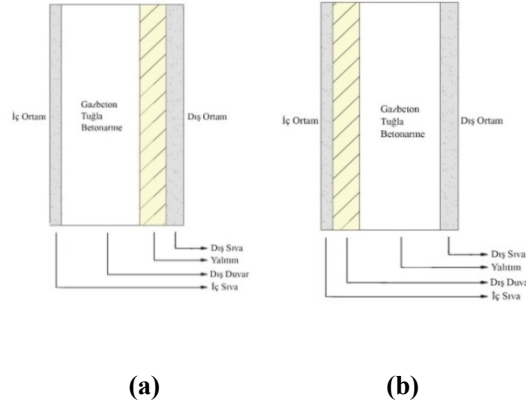
Yapı kabuğu en çok dış duvarlar olmak üzere, döşeme, çatı, pencere ve kapı elemanları üzerinden ısı kaybeder. Bu çalışmada hesaplamalar yapılırken, ısı kayıplarının sadece dış duvar üzerinden gerçekleştiği kabul edilmiştir. Çalışmada TS 825 Isı Yalıtım Kuralları Standardına göre 4. Ve 5. Bölgede yer alan beş il için hesaplamalar yapılmıştır. 4. Ve 5. Bölgelerin en yüksek ve en düşük derece gün sayısına sahip illeri seçilmiştir. Çalışılan illerin derece gün sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İllerin DGS değerleri [26].

İller	Derece Bölgeleri	DGS
<b>Erzincan</b>	4	3047
<b>Yozgat</b>	4	3422
<b>Bayburt</b>	4	4149
<b>Ağrı</b>	5	4423
<b>Ardahan</b>	5	5137

## 2.1. Bina duvarlarının yapısı

Çalışmada gazbeton, tuğla ve betonarme duvar olmak üzere üç farklı yapı malzemesi için içten ve dıştan yalıtımın olduğu iki farklı duvar tipi kullanılmıştır. Şekil 1(a) ve (b)'de duvar katmanlarına ait bilgiler sunulmuştur. Buna göre 2 cm iç sıva, 13,5 cm gaz beton, 13,5 cm tuğla, 16 cm betonarme duvar, yalıtım malzemeleri ve 3 cm dış sıvadan oluşan dıştan ve içten yalıtımlı duvar modelleri için hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 2' de yapı bileşenlerine ait özellikler, Tablo 3'te ise hesaplamalarda kullanılan yalıtım malzemelerine ve yakıt türlerine ait veriler sunulmuştur.



**Şekil 1.** Hesaplamalarda kullanılan duvar tipleri a) Dıştan yalıtımlı b) İçten yalıtımlı.

**Tablo 2.** Yapı bileşenlerinin termofiziksel özellikleri [26].

Malzeme	Dıştan Yalıtımlı Duvar			İçten Yalıtımlı Duvar		
	Kalınlık (m)	k (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	Kalınlık (m)	k (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
<b>İç Sıva</b>	0,020	1	0,020	0,020	1	0,020
<b>Dış Sıva</b>	0,030	1,600	0,018	0,030	1,600	0,018
<b>Gazbeton</b>	0,135	0,200	0,675	0,135	0,200	0,675
<b>Tuğla</b>	0,135	0,450	0,300	0,135	0,450	0,300
<b>Betonarme</b>	0,160	2,500	0,064	0,160	2,500	0,064
<b>R<sub>i</sub></b>			0,130			0,130
<b>R<sub>d</sub></b>			0,040			0,040
<b>Gazbeton R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,883</b>			<b>0,883</b>
<b>Tuğla R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,508</b>			<b>0,508</b>
<b>Betonarme R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,272</b>			<b>0,272</b>

**Tablo 3.** Hesaplamalarda Kullanılan Parametreler [27, 28].

Yalıtım Malzemesi	k (W/mK)	Birim Fiyat (\$/m <sup>3</sup> )	Yakıt	H <sub>u</sub>	η	Birim Fiyat (\$/m <sup>3</sup> )
Cam Yünü	0,039	45	Doğal gaz	34,541 kJ/m <sup>3</sup>	0,90	0,219
Taş Yünü	0,040	80	İthal Kömür	25,120 kJ/kg	0,65	0,259 \$/kg
XPS	0,030	90				
EPS	0,035	40				

## 2.2. Bina duvarlarının ısı kaybı ve yıllık enerji ihtiyacı

Dış duvarın birim alanından gerçekleşen ısı kaybı Q (W/m<sup>2</sup>) [7],

$$Q=U \cdot \Delta t \quad (1)$$

şeklinde Denklem 1 ile hesaplanır. Toplam ısı geçiş katsayısı olan U (W/m<sup>2</sup>K),

$$U= \frac{1}{R_{iç\ siva}+ R_{duvar}+ R_{yalıtım}+ R_{dış\ siva}} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanır (Denklem 2) [7]. Burada R (m<sup>2</sup>K/W) olup ısı iletim direncini göstermektedir. Birim alandan gerçekleşen yıllık ısı kaybı Q<sub>yıl</sub> (W/m<sup>2</sup>) ise U (W/m<sup>2</sup>K) ve derece gün sayısı kullanılarak hesaplanır (Denklem 3).

$$Q_{yıl}=86400 \cdot DGS \cdot U \quad (3)$$

Isıtma için gerekli yıllık enerji ihtiyacı E<sub>yıl</sub> (W/m<sup>2</sup>), birim alandan gerçekleşen yıllık ısı kaybının sistem verimine bölünmesi ile Denklem 4 kullanılarak bulunur [7].

$$E_{yıl}=(86400 \cdot DGS \cdot U)/\eta \quad (4)$$

## 2.3. Yıllık enerji maliyeti ve optimum yalıtım kalınlığının hesaplanması

Enerji maliyeti hesaplanırken gelecek değer faktörü olarak nitelendirilen bir parametre kullanılır ve belirlenen bir zaman dilimine göre hesaplamalar yapılır. Enflasyon ve faiz oranlarına bağlı olarak değişen GDF Denklem 5 ile [7];

$$GDF= \frac{(1+r)^N-1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. GDF' nin hesaplanmasında kullanılan 2020 yılı TÜİK verileri Tablo 4'de verilmiştir. i faiz oranını, g enflasyon oranını, r gerçek faiz oranını ve N ömür süresini ifade etmektedir.

**Tablo 4.** GDF parametresinin hesaplanması.

Parametre	Değeri
<b>i</b>	%11
<b>g</b>	%11,86
<b>r</b>	0,071
<b>N</b>	10 yıl
<b>GDF</b>	<b>7,035</b>

Birim yüzeyi ısıtmak için gereken yıllık enerji maliyeti  $C_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ),

$$C_{yıl} = \frac{86400 \cdot DGS \cdot U \cdot C_{yakıt}}{H_u \cdot \eta} \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanır (Denklem 6). Bulunan GDF değerinin yıllık gereken enerji maliyeti  $C_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ile çarpılması sonucunda enerji maliyeti değeri ( $\$/m^2$ ) Denklem 7 ile hesaplanmaktadır [7].

$$\text{Enerji Maliyeti} = C_{yıl} \cdot GDF \quad (7)$$

Yalıtım maliyeti ( $\$/m^2$ ) ise, yalıtım malzemesinin birim fiyatının  $C_{yalıtım}$  ( $\$/m^3$ ) yalıtım kalınlığı (m) ile çarpılması sonucu bulunur ve Denklem 8'de sunulmuştur [7].

$$\text{Yalıtım Maliyeti} = C_y \cdot x \quad (8)$$

Bir binanın toplam ısıtma maliyeti  $C_{yalıtım \text{ toplam}}$  ( $\$/m^2$ ), enerji maliyetinin ve yalıtım maliyetinin toplamı olarak hesaplanır (Denklem 9) [7].

$$C_{yalıtım \text{ toplam}} = C_{yıl} \cdot GDF + C_y \cdot x \quad (9)$$

Toplam ısıtma maliyetini minimuma indiren optimum yalıtım kalınlığı (m) ise;

$$X_{op} = 293,94 \cdot \left( \frac{DGS \cdot C_{ykt} \cdot GDF \cdot k}{H_u \cdot C_{mlz} \cdot \eta} \right)^{1/2} - k \cdot R_{duvt} \quad (10)$$

formülü ile hesaplanır [7]. Denklem 10'da sunulduğu üzere optimum yalıtım kalınlığı, yakıtın özelliklerine ve maliyetine, yalıtım malzemesinin özelliklerine ve maliyetine, gelecek değer faktörüne, bölgenin derece gün sayısına ve duvarın fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

## 2.4. Enerji tasarrufu miktarı

Ömür maliyet analizi yöntemine göre net tasarruf miktarı  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) Denklem 11'de sunulmuştur [7].

$$A_{yıl} = C_{toplam} - C_{yalıtım \text{ toplam}} \quad (11)$$

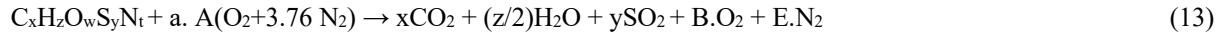
Burada  $C_{toplam}$  ( $\$/m^2$ ) 10 yıllık süre boyunca yalıtılmamış bir binanın ısıtma maliyetini,  $C_{yalıtım \text{ toplam}}$  ( $\$/m^2$ ) ise yalıtılmış bir binanın toplam ısıtma maliyetini ifade etmektedir.

## 2.5. Yıllık yakıt tüketimi ve çevresel etki analizi

Bir binadaki yıllık yakıt tüketimi  $m_{fA}$  ( $kg/m^2$ ,  $m^3/m^2$ ) [14] Denklem 12'de sunulmuştur ve

$$m_{fA} = \frac{86400 \cdot DGS \cdot U}{H_u \cdot \eta} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yakıt tüketimine bağlı olarak gerçekleşen  $CO_2$  emisyonun hesaplanmasında yakıtın yanma tepkimesi baz alınmaktadır. Yakıt için yanmanın genel kimyasal formülü Denklem 13'te sunulmuştur ve [14];



eşitliği ile hesaplanır [28]. x, z, w, y, t değerlerinin bulunmasında kullanılan yakıtların kimyasal formülleri Tablo 5'de sunulmuştur.

**Tablo 5.** Yakıtların kimyasal formülleri [29].

Yakıt	Kimyasal Formül
<b>Doğal gaz</b>	$C_{1,05}H_4O_{0,034}N_{0,022}$
<b>Kömür</b>	$C_{7,078}H_{5,149}O_{0,517}S_{0,01}N_{0,086}$

CO<sub>2</sub> emisyonu (kg/m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) [14],

$$m_{CO_2} = \frac{44 \cdot x}{M} \cdot m_{FA} \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanır (Denklem 14). M, yakıtın mol kütlesi olup Denklem 15 ile hesaplanmaktadır [14].

$$M = 12x + z + 16w + 32y + 14t \quad (15)$$

## 2.6. Bina Duvarlarında Yoğuşma Kontrolü

Yalıtım yapılırken yapı malzemelerinin içinde bulunan su buharı da göz önünde bulundurulmalı ve su buharı hareketlerinin sebep olduğu yoğuşma olayına dikkat edilmelidir. Su buharı hareketleri yapı malzemelerinin performanslarını olumsuz etkilediği gibi yapıda ısı transferlerinin artmasına da neden olmaktadır. Yapıda su buharı difüzyonu sonucu oluşan yoğuşma olayı önlenemez ise, dış duvarlarda zamanla rutubet oluşmaktadır [30].

Bina kabuğunu oluşturan yapı elemanlarının nem ile ilgili performanslarının hesaplanmasında TS 825’de bulunan Glaser Grafik Yöntemi kullanılmaktadır. Yapı elemanlarının buhar basınç değerleri farklı olduğu için yapı elemanları arasında nem geçişi meydana gelmektedir. Bu grafik sisteminde, eş değer hava tabakası kalınlığı ile buhar basınç değerleri arasındaki bağlantı verilerek katmanlar arası nem geçişinin yoğuşmaya sebep olup olmadığı ortaya koyulmaktadır [30].

Glaser yönteminde kullanılan eş değer hava tabakası kalınlığı S<sub>d</sub> (m) [2],

$$S_d = \mu \cdot L \quad (16)$$

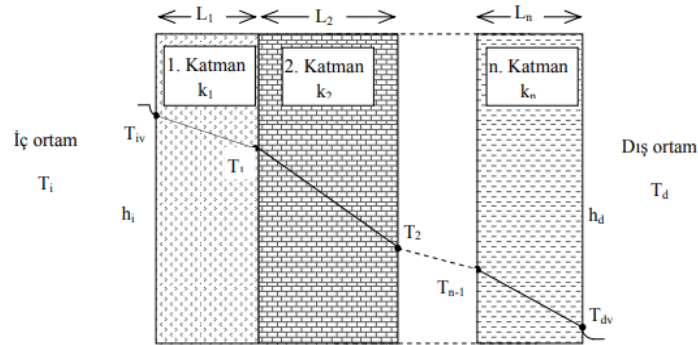
denklemi ile bulunur. Denklem 16’da sunulan  $\mu$  (birimsiz) buhar difüzyonu direnç katsayısını, L (m) duvar tabaka kalınlığını belirtmektedir.

Yapı kabuğunu oluşturan katmanların doymuş su buhar basınçları P<sub>s</sub> (Pa) yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak değişmekte ve her bir sıcaklığa denk gelen doymuş su buhar basıncı değerleri TS 825’de yer almaktadır. Kısmi su buhar basıncı P (Pa) ise [2],

$$P = P_s \cdot \Phi \quad (17)$$

formülü ile bulunur. Denklem 17’ de bulunan  $\Phi$  birimsiz olup bağıl nem değerini göstermektedir.

Bir yapı elemanı bünyesindeki su buharı basıncı (P), doymuş su buhar basıncına (P<sub>s</sub>) ulaştığında yoğuşma gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yoğuşma olayının gözlenmemesi için yapı elemanlarının bünyesindeki su buharı basıncının (P), doymuş su buhar basıncından (P<sub>s</sub>) küçük değerde olması istenmektedir. Glaser grafik yönteminin kullanıldığı iç ortam ile dış ortam arasındaki duvar katmanlarını ve bu katmanların yüzey sıcaklıklarının değişimini gösteren duvar kesiti Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Duvar Katmanlarının Gösterimi [30].

İç ve dış ortam sıcaklıkları tespit edildikten sonra ara yüzey sıcaklıkları sırası ile [30];

$$T_1 = T_{iç} - \frac{L_1}{k_1} \cdot Q_{toplam} \quad (18)$$



$$T_2 = T_{iç} - \frac{L_2}{k_2} \cdot Q_{toplam} \quad (19)$$

$$T_n = T_{iç} - \frac{L_n}{k_n} \cdot Q_{toplam} \quad (20)$$

Şeklinde Denklem 18,19 ve 20 kullanılarak hesaplanmaktadır [2].  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$  (°C) duvar katmanları arasındaki her bir sıcaklık değerini ifade etmektedir.  $T_1$  iç ortam sıcaklığı,  $T_n$  dış ortam sıcaklığıdır. Her bir yüzeyin sahip olduğu buhar basıncı değeri, bu yüzey sıcaklıklarına göre bulunmaktadır [30]. Yoğuşma hesabının yapılmasında kullanılan iklim verileri Tablo 6'da sunulmuştur. Kullanılan iklim elemanlarının saatlik değişimleri göz önünde bulundurulmayıp ay boyunca sabit kaldıkları varsayılmıştır. Dış ortam sıcaklığı meteorolojiden alınan saatlik sıcaklık verilerine göre belirlenmiş ve o ilde görülen en düşük sıcaklık değerleri alınmıştır.

**Tablo 6.** İklim parametreleri [31].

Parametre	Değeri
İç ortam sıcaklığı	20 °C
Dış ortam sıcaklığı Erzincan	-15,6 °C
Dış ortam sıcaklığı Ardahan	-20 °C
İç ortam bağıl nem	$\Phi= 0,5$ (%50)
Dış ortam bağıl nem	$\Phi= 0,8$ (%80)

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada TS825'e göre 4. ve 5. bölgede bulunan 5 il (Erzincan, Yozgat, Bayburt, Ardahan, Ağrı) için üç farklı duvar tipinde; iki farklı yalıtım uygulaması, dört farklı yalıtım malzemesi ve iki farklı yakıt türü için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri hesaplanmış ve 2 il için dıştan ve içten yalıtımlı duvar modellerinde yoğuşma kontrolü yapılmıştır. Dıştan ve içten yalıtımlı duvar uygulamalarında hesaplanan R değerleri aynı olduğu için bulunan tüm değerler (optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarrufları, CO<sub>2</sub> emisyonları) aynı çıkmıştır. Bu nedenle bu yalıtım sistemleri yoğuşma faktörü üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen gazbeton duvar verileri Tablo 7'de, tuğla duvar verileri Tablo 8'de ve betonarme duvar verileri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Ağrı ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,053 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,184 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 8,704- 141,708 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,052- 0,570 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 8,848- 19,990 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Ardahan için en düşük optimum yalıtım kalınlığı 0,059 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığı 0,199 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için elde edilmiştir. Enerji tasarrufu 10,957- 165,816 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,048- 0,508 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 9,535- 21,544 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Bayburt ili değerlerine bakıldığında en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,05 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,17 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 7,866- 132,482 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,054-0,525 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 8,569- 19,361 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Erzincan ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,039 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,151 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 4,679- 95,561 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,063-0,777 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344-16,592 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir.

**Tablo 7.** Gazbeton duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ve  $CO_2$  emisyonu  $m_{CO_2}$  ( $kg/m^2$ ) değerleri.

	Doğal gaz			Kömür		
Taş yünü	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
Erzincan	0,045	4,679	11,102	0,086	16,704	16,592
Yozgat	0,050	5,725	11,766	0,093	19,640	17,583
Bayburt	0,059	7,866	12,956	0,106	25,500	19,361
Ağrı	0,062	8,704	13,376	0,111	27,757	19,990
Ardahan	0,070	10,957	14,416	0,122	33,738	21,544
<b>Cam yünü</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,072	6,755	8,222	0,125	20,459	12,287
Yozgat	0,078	8,002	8,713	0,135	23,696	13,022
Bayburt	0,090	10,502	9,594	0,152	30,095	14,338
Ağrı	0,094	11,468	9,906	0,158	32,542	14,804
Ardahan	0,104	14,034	10,676	0,173	38,994	15,954
<b>XPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,039	5,290	10,198	0,072	17,842	15,241
Yozgat	0,043	6,399	10,808	0,078	20,872	16,151
Bayburt	0,050	8,652	11,900	0,089	26,902	17,784
Ağrı	0,053	9,531	12,287	0,093	29,218	18,362
Ardahan	0,059	11,882	13,242	0,102	35,347	19,789
<b>EPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,076	7,464	7,344	0,129	21,680	10,975
Yozgat	0,082	8,772	7,782	0,139	25,008	11,630
Bayburt	0,094	11,382	8,569	0,156	31,572	12,806
Ağrı	0,098	12,386	8,848	0,162	34,078	13,222
Ardahan	0,108	15,049	9,535	0,177	40,673	14,250

**Tablo 8.** Tuğla duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ve  $CO_2$  emisyonu  $m_{CO_2}$  ( $kg/m^2$ ) değerleri.

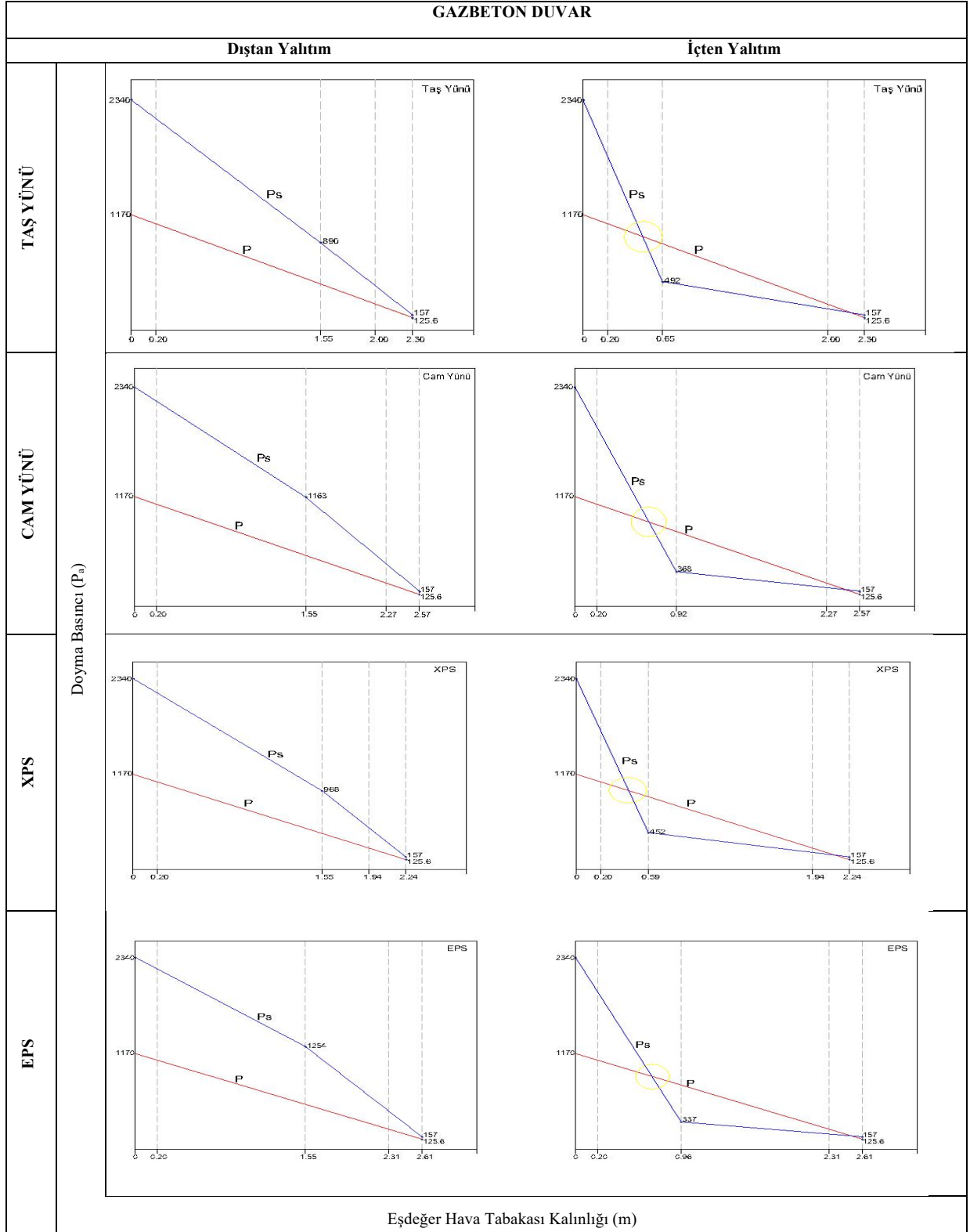
	Doğal gaz			Kömür		
Taş yünü	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
Erzincan	0,060	14,386	11,102	0,101	40,064	16,592
Yozgat	0,065	16,775	11,766	0,108	46,023	17,583
Bayburt	0,074	21,518	12,956	0,121	57,743	19,361
Ağrı	0,077	23,338	13,376	0,126	62,208	19,990
Ardahan	0,085	28,146	14,416	0,137	73,944	21,544
<b>Cam yünü</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,087	17,005	8,222	0,140	44,361	12,287
Yozgat	0,093	19,594	8,713	0,149	50,620	13,022
Bayburt	0,104	24,696	9,594	0,166	62,879	14,338
Ağrı	0,108	26,643	9,906	0,172	67,535	14,804
Ardahan	0,118	31,765	10,676	0,187	79,742	15,954
<b>XPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,051	15,185	10,198	0,084	41,389	15,241
Yozgat	0,055	17,636	10,808	0,090	47,442	16,151
Bayburt	0,062	22,492	11,900	0,100	59,332	17,784
Ağrı	0,064	24,352	12,287	0,104	63,857	18,362
Ardahan	0,070	29,529	13,242	0,113	75,740	19,789
<b>EPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,089	17,847	7,344	0,143	45,715	10,975
Yozgat	0,095	20,497	7,782	0,152	52,066	11,630
Bayburt	0,107	25,709	8,569	0,169	64,489	12,806
Ağrı	0,111	27,695	8,848	0,175	69,203	13,222
Ardahan	0,121	32,913	9,535	0,190	81,554	14,250

**Tablo 9.** Betonarme duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  (\$/m<sup>2</sup>) ve CO<sub>2</sub> emisyonu  $m_{CO_2}$  (kg/m<sup>2</sup>) değerleri

Taş yünü	Doğal gaz			Kömür		
	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,070	35,915	11,102	0,110	89,485	16,592
<b>Yozgat</b>	0,075	41,046	11,766	0,118	101,619	17,583
<b>Bayburt</b>	0,083	51,106	12,956	0,131	125,311	19,361
<b>Ağrı</b>	0,086	54,930	13,376	0,135	134,288	19,990
<b>Ardahan</b>	0,094	64,960	14,416	0,146	157,781	21,544
<b>Cam yünü</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,096	38,875	8,222	0,149	94,123	12,287
<b>Yozgat</b>	0,102	44,206	8,713	0,158	106,557	13,022
<b>Bayburt</b>	0,113	54,626	9,594	0,176	130,788	14,338
<b>Ağrı</b>	0,118	58,576	9,906	0,182	139,956	14,804
<b>Ardahan</b>	0,127	68,921	10,676	0,197	163,921	15,954
<b>XPS</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,058	36,831	10,198	0,091	90,928	15,241
<b>Yozgat</b>	0,062	42,026	10,808	0,097	103,156	16,151
<b>Bayburt</b>	0,069	52,199	11,900	0,107	127,017	17,784
<b>Ağrı</b>	0,071	56,062	12,287	0,111	136,054	18,362
<b>Ardahan</b>	0,077	66,191	13,242	0,120	159,696	19,789
<b>EPS</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,097	39,801	7,344	0,151	95,561	10,975
<b>Yozgat</b>	0,104	45,193	7,782	0,160	108,081	11,630
<b>Bayburt</b>	0,115	55,722	8,569	0,178	132,482	12,806
<b>Ağrı</b>	0,119	59,712	8,848	0,184	141,708	13,222
<b>Ardahan</b>	0,129	70,152	9,535	0,199	165,816	14,250

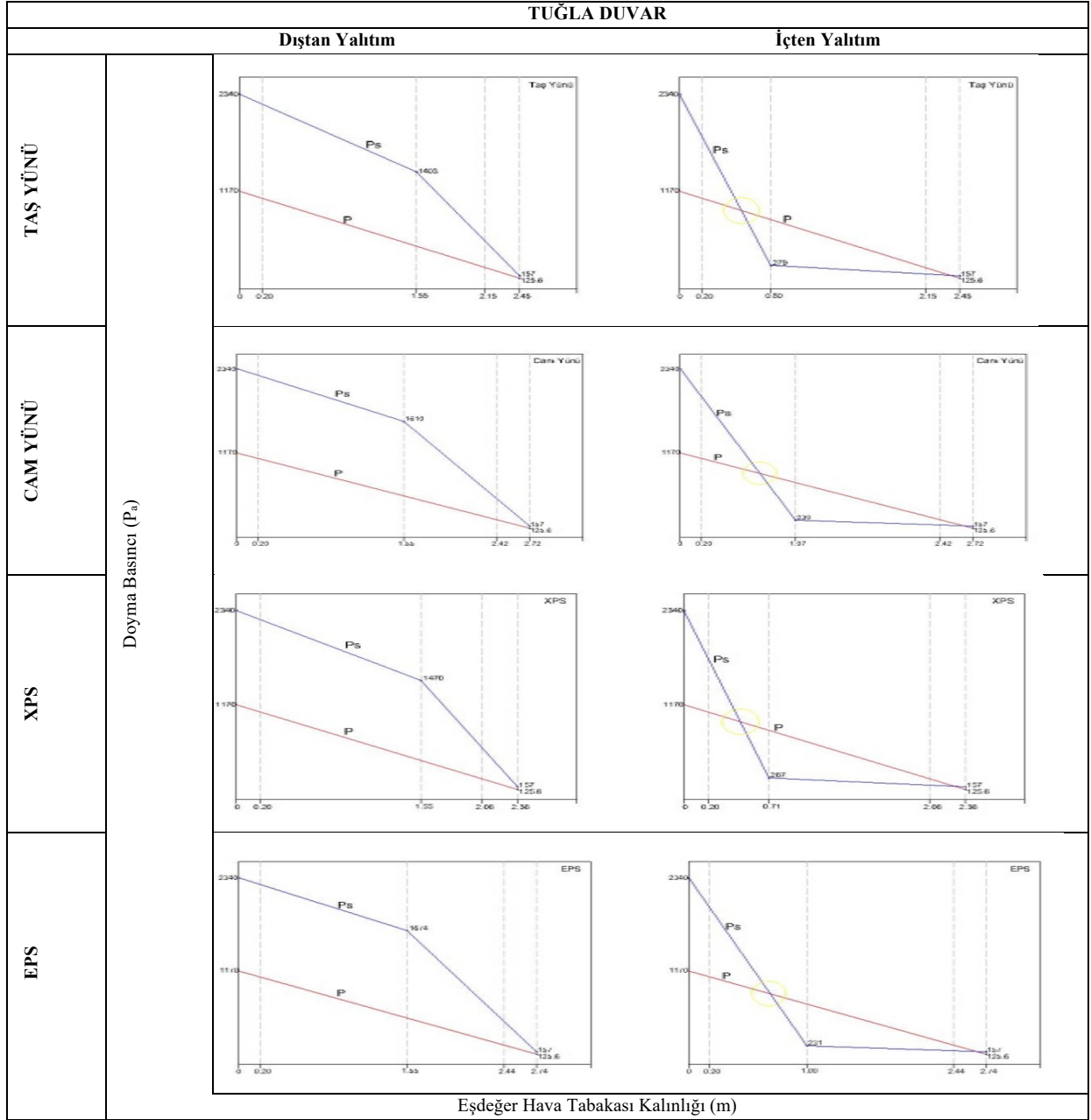
Yozgat ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,043 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,160 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 5,725-108,081 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,059- 0,703 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,782-17,583 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Optimum yalıtım kalınlığı; taş yünü için 4,5- 14,6 cm, cam yünü için 7,2-19,7 cm, XPS için 3,9- 12 cm, EPS için 7,6- 19,9 cm arasında değişmiştir. Yalıtım malzemesinin optimum yalıtım kalınlığı üzerindeki etkisine bakıldığında en yüksek yalıtım kalınlığının EPS için elde edildiği, onu sırasıyla cam yünü, taş yünü ve XPS'in takip ettiği görülmektedir. Enerji tasarrufu açısından sıralamanın EPS, cam yünü, XPS ve taş yünü şeklinde değişmiş, CO<sub>2</sub> emisyonu değerlerine göre ise en iyi sonuç EPS ile elde edilmiştir. Sonuç olarak EPS'nin CO<sub>2</sub> emisyonu düşük ve enerji tasarrufu fazla olduğu için en avantajlı yalıtım malzemesi olduğu söylemek mümkündür. Duvar malzemesine göre ise CO<sub>2</sub> emisyonu üç malzeme için değişmezken, optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tasarrufu açısından en yüksek değerlerin betonarme duvar için elde edildiği, onu sırasıyla tuğla ve gaz beton duvarın takip ettiği görülmektedir. Buna göre gazbetonun en düşük yalıtım kalınlığını sağladığı için en avantajlı duvar malzemesi olarak önerilmesi mümkündür. Doğal gaz yakıtının kullanımında kömüre göre; optimum yalıtım kalınlığının ve CO<sub>2</sub> emisyonunun daha az, doğal gaz yakıtı ile binanın ısıtılmasında daha az enerji tüketildiği için enerji tasarrufunun da daha az olduğu görülmektedir. Yalıtım kalınlıklarının yoğuşma kontrolü tüm illerde benzer sonuçlar oluştuğu için yalnızca iki ilin verileri üzerinden paylaşılmıştır. 4.bölgede bulunan Erzincan, 5.bölgede bulunan Ardahan ilinin verileri üç duvar tipinde dört yalıtım malzemesi için değerlendirilmiştir. Erzincan ilinin verileri Şekil 3-4-5'te, Ardahan ilinin verileri Şekil 6-7-8'de sunulmuştur.

Şekil 3– Şekil 8 arasında dıştan yalıtım uygulamalarında yapı elemanlarında oluşan kısmi buhar basıncının (P) doymuş su buharı basıncını (Pa) geçmediği, doymuş su buharı basıncı değerine ulaşmadığı; içten yalıtım uygulamalarında ise yapı elemanlarında oluşan kısmi buhar basıncının (P) doymuş su buharı basıncına (Pa) ulaştığı görülmektedir. Grafiklerde gösterilen kısmi buhar basıncı (P) ile doymuş su buharı basıncı (Pa) değerlerinin dıştan yalıtım uygulamalarında çakışmadığı, içten yalıtım uygulamasında çakıştığı görülmektedir. Çakışmanın olduğu içten yalıtım uygulamalarındaki yoğuşmanın TS 825'e göre yapıya zarar verdiği bilinmektedir. En düşük DGS değerine sahip Erzincan ilinde oluşan basınç değerlerinin, en yüksek DGS değerine sahip Ardahan ilinde oluşan basınç değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Erzincan ilinde görülen en düşük sıcaklık -15,6 °C, Ardahan ilinde görülen en düşük sıcaklık -20 °C olarak Tablo 6'da yer almaktadır.

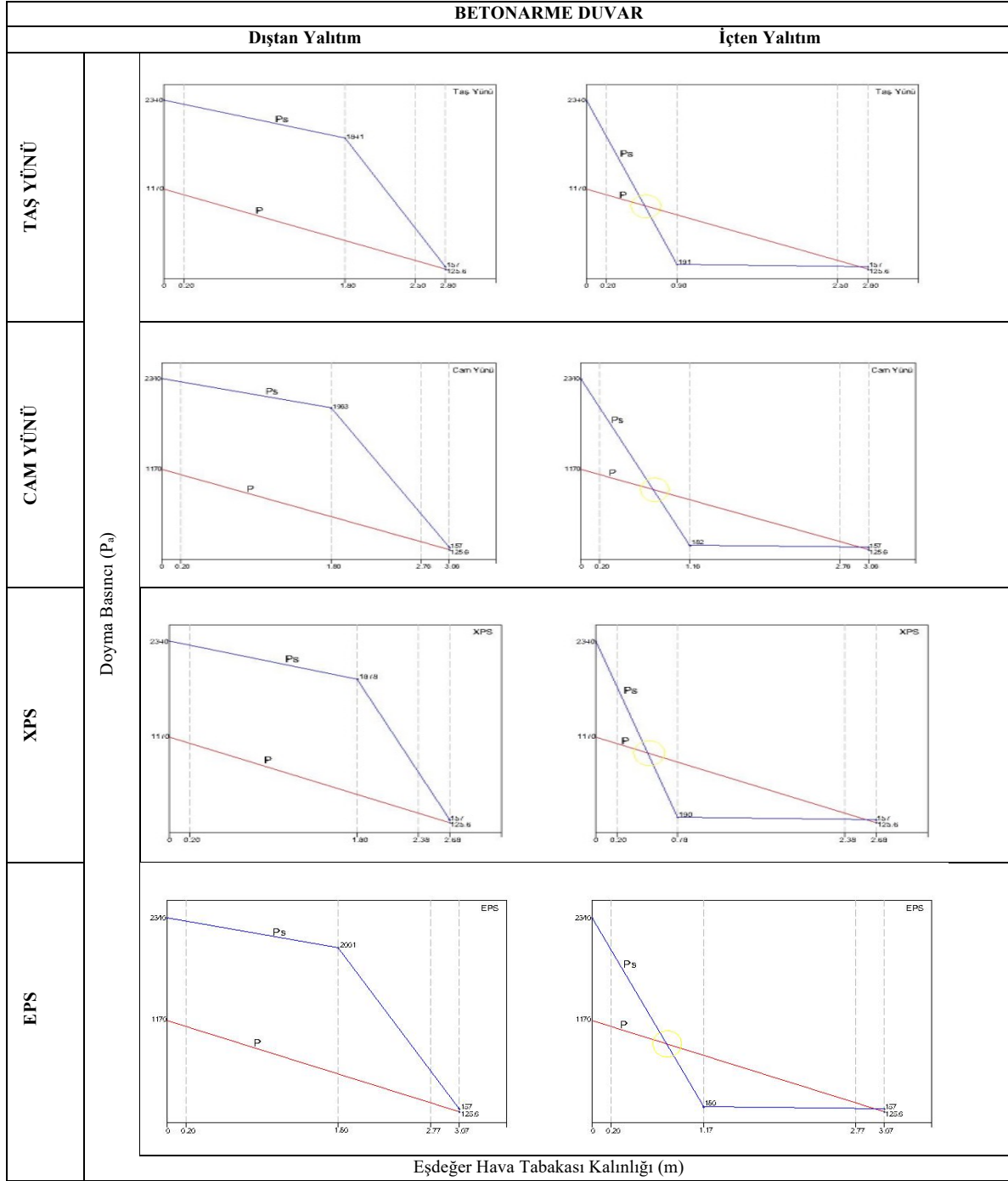


Şekil 3. Erzurum ili gazbeton duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi

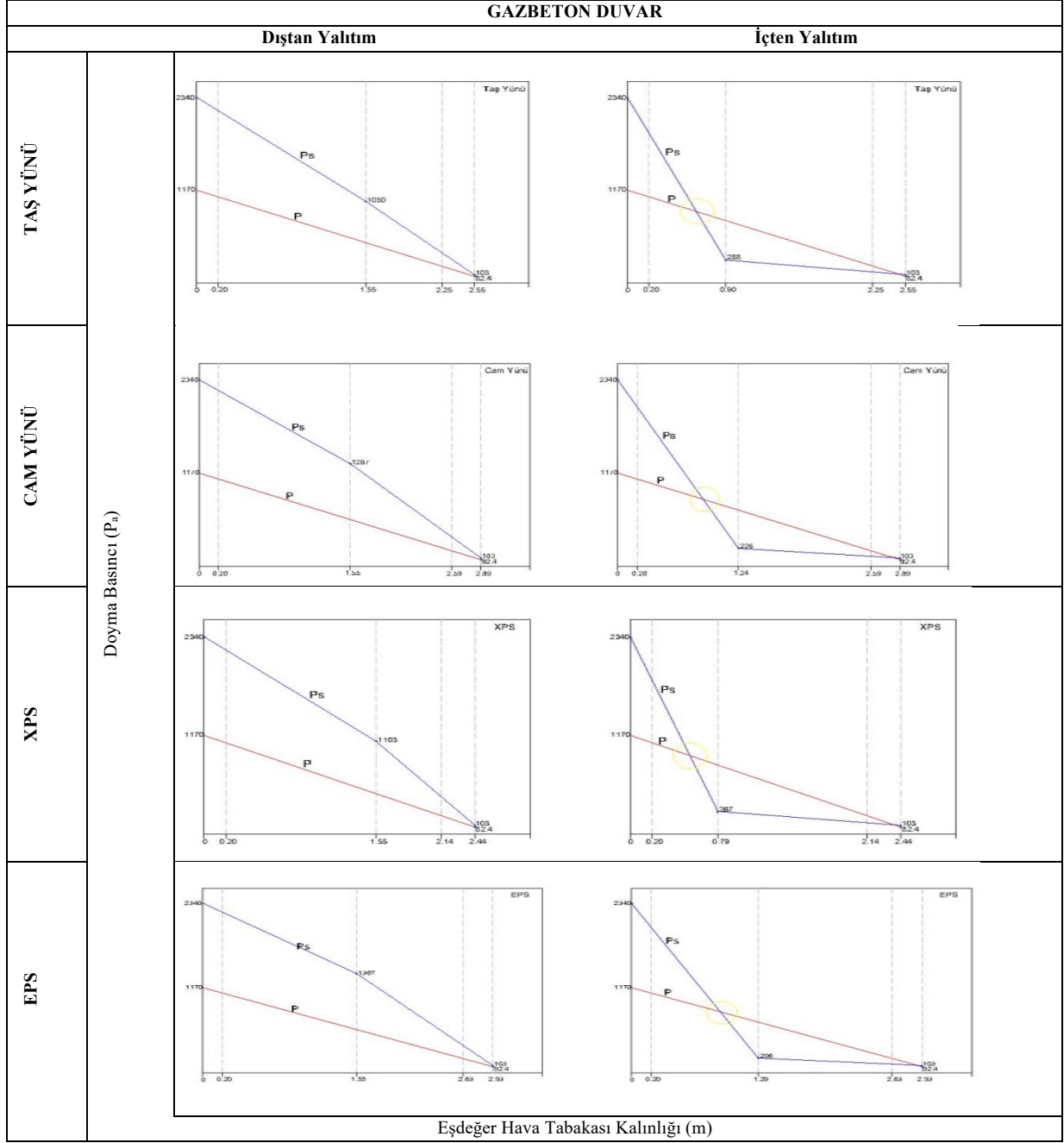


Şekil 4. Erzincan ili tuğla duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

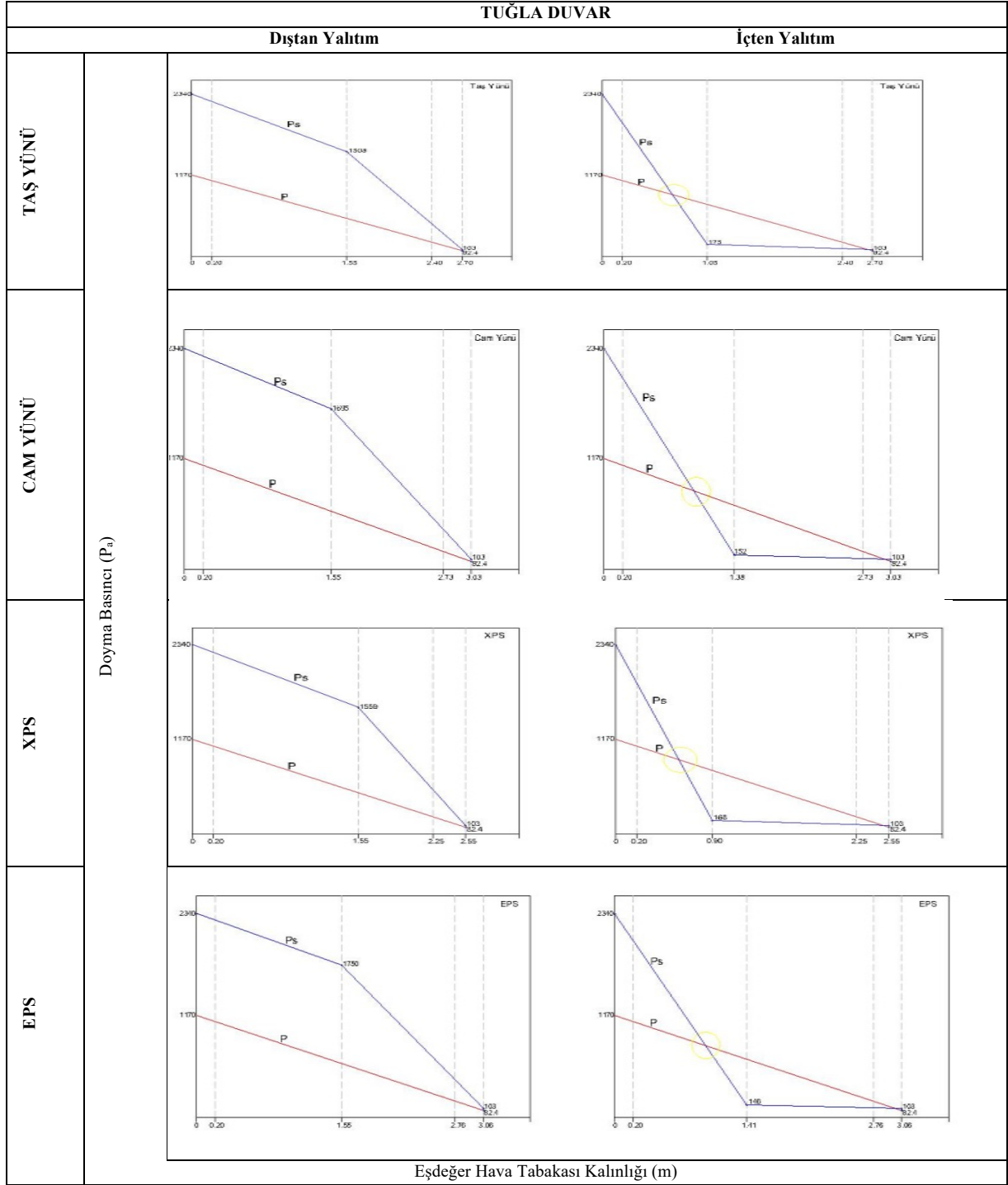


Şekil 5. Erzincan ili betonarme duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi



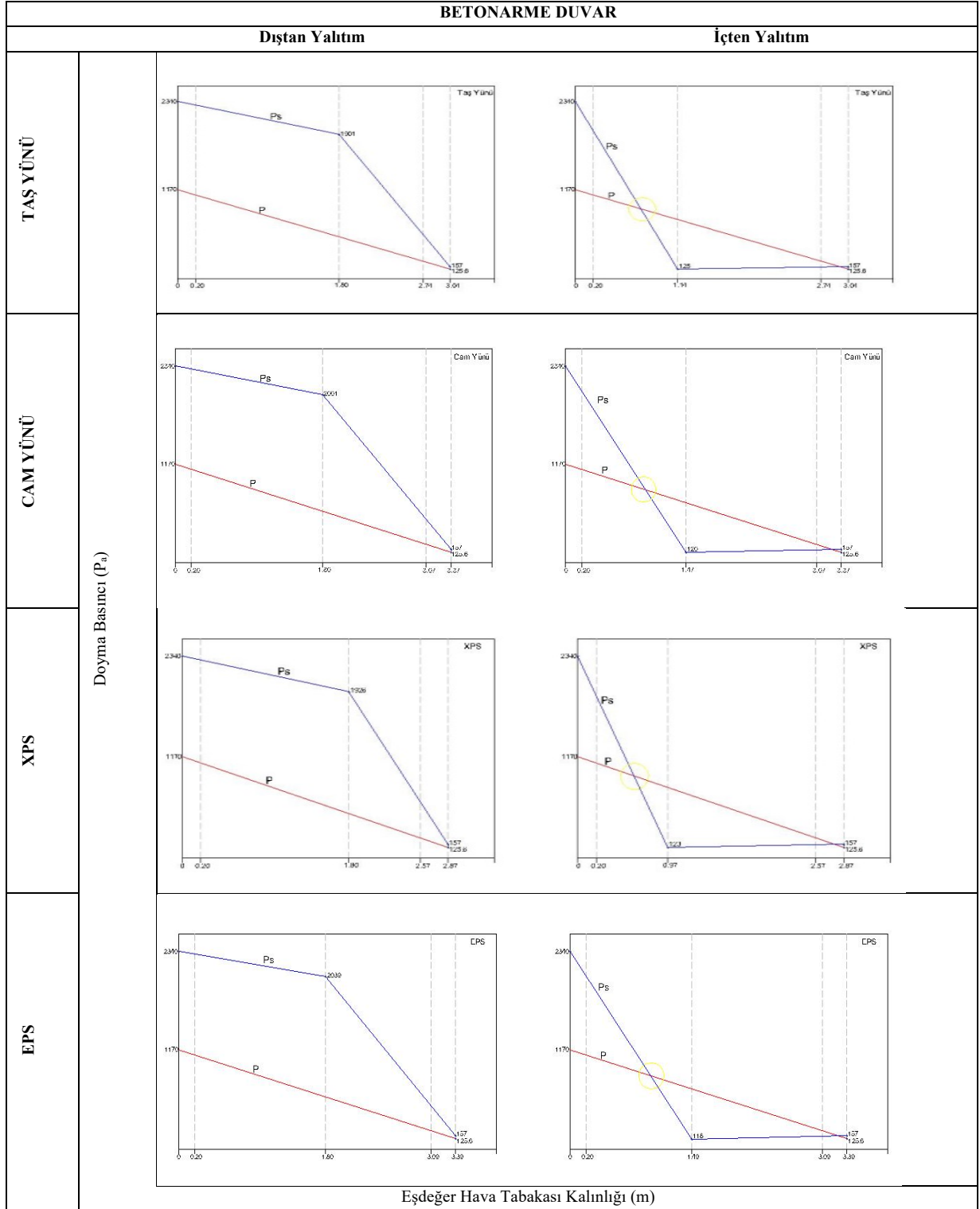
Şekil 6. Ardahan ili gazbeton duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.



Şekil 7. Ardahan ili tuğla duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.



Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi



Şekil 8. Ardahan ili betonarme duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Oluşan basınç değerlerinin illerin sıcaklık değerlerine bağlı olarak değiştiği ve sıcaklık ile basınç değerleri arasında doğru orantılı olarak geliştiği tespit edilmiştir. Duvar tiplerindeki basınç değerleri yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla gaz beton, tuğla, betonarme duvar olarak bulunmuştur. Soğuk iklim bölgesinde yoğunlaşma düşük basınç değerlerinde gerçekleştiği için, bu iklim bölgesi için yoğunlaşmaya karşı en uygun malzeme gaz beton olarak öne çıkmaktadır. Yoğunlaşma kontrolünde yalıtımın uygulanma biçiminin yalıtım malzemesinden daha önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum Şekil 3-8 arasında sunulan grafiklerde de görülmektedir. Dıştan yalıtım malzemelerindeki basınç değerleri yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla EPS, cam yünü, taş yünü, XPS şeklinde olup değerleri birbirlerine yakındır. Dört yalıtım malzemesinin de dıştan yalıtım uygulamasında yoğunlaşma olmadığı, içten yalıtım uygulamasında yoğunlaşma olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yoğunlaşma kontrolünde yalıtımın uygulanma biçiminin, yalıtım malzemesinin türünden daha önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il için ısıtma döneminde enerji maliyeti-tasarrufları dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmıştır. TS 825 standardına göre 4. ve 5. bölgede bulunan bu illerin verileri tablolarla ve grafiklerle sunulmuştur. Duvar tipine, yalıtımın uygulanma biçimine, yalıtım malzemesinin özelliklerine, kullanılan yakıtın türüne ve illerin DGS değerlerine bağlı olarak değişen optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarruf miktarları, geri ödeme süreleri ve CO<sub>2</sub> emisyon miktarları ömür maliyet analizi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre;

Elde edilen verilere göre enerji tasarrufu; doğal gaz için 4,679 – 70,152 \$/m<sup>2</sup>, kömür için 16,704 – 165,816 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu; doğal gaz için 7,344 – 14,416 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, kömür için 10,975 – 21,544 kg/m<sup>2</sup> arasında olmaktadır. Bu verilere bakılarak optimum yalıtım uygulamaları sayesinde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlandığı, CO<sub>2</sub> emisyonunu büyük oranda azalttığı, optimum yalıtım uygulanması ile CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalmanın soğuk iklim bölgelerinde doğal gaz için %75, kömür için %90 oranında olduğu tespit edilmiştir. Gazbeton duvar, EPS yalıtım malzemesi ve doğal gaz yakıtı ile kullanıldığında; enerji tasarrufu 7,464 \$/m<sup>2</sup> – 15,049 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> – 9,535 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, betonarme duvar, taş yünü yalıtım malzemesi ve kömür yakıtı ile kullanıldığında; enerji tasarrufu 89,485 \$/m<sup>2</sup> – 157,781 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu 16,592 kg/m<sup>2</sup> – 21,544 kg/m<sup>2</sup> değerleri arasındadır. Farklı bileşenlerin bir araya getirilmesi ile bu sonuçlar değişebilmektedir. En iyi sonucu sağlayan duvar bileşenlerinin (gazbeton duvar, yalıtım malzemesi olarak EPS, yakıt türü olarak doğal gaz) Erzurum ilinde kullanıldığında enerji tasarrufu 7,464 \$/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, Ardahan ilinde kullanıldığında ise enerji tasarrufu 15,049 \$/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> emisyonu 9,535 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Diğer illerin değerleri bu iki ilin verileri arasında değişmektedir. İçten yalıtım uygulaması yapılmasının zorunlu olduğu durumlarda, gazbeton duvar malzemesi ve yalıtım malzemesi yoğunlaşma ihtimaline karşı en iyi sonucu vermiştir ve çalışma kapsamında bu malzemelerin seçilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak binanın yapıldığı bölgenin iklim özelliklerine uygun olarak yapılan doğru yalıtım uygulamaları sayesinde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanmakta ve çevre kirliliği büyük oranda azalmaktadır. Sürdürülebilir yapıların ve kentlerin oluşması için önemli etmenlerden biri olan yalıtım uygulamaları, bu özellikleri ile ekosistemin korunmasını, ülkelerin ekonomik kalkınmasını ve refah seviyesinin artmasını sağlayarak ihmal edilmemesi gereken tasarım uygulamalarından biri olmaktadır.

#### Notlar

Bu çalışma Sefa Kizirgil'in Doç. Dr. Ayça Gülden danışmanlığında tamamladığı "Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Çevresel Etki Analizi" başlıklı tez çalışmasından üretilmiştir. Fikir sahibi A.G. Hesaplamalar: S.K.S. Makale yazımı: A.G. ve S.K.S.

#### Kaynaklar

- [1] Köken K. Sürdürülebilir Kentsel Tasarım Kriterleri Açısından Kentsel Dönüşüm Projelerinin İncelenmesi. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, 2017
- [2] Kurekci NA. Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. Energy and Buildings 2016;118:197-213.
- [3] Demir, İH. Bina Dış Duvarları İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi ve Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

- [4] Karakaya H. Farklı Duvar ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma ve Soğutmada Tespiti ve Çevresel Etkileri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018;30(2):193-202.
- [5] Kürekçi A, Erdem S. Isıtma ve Soğutma Derece Gün Değerlerinin Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığına Etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2019;172:7-20.
- [6] Kürekçi NA, Özcan M. A Practical Method for Determination of Economic Insulation Thickness of Steel, Plastic and Copper Hotwater Pipes. Journal of Thermal Engineering 2020; 6 (1):72-86.
- [7] Aytaç A, Aksoy UT. Enerji Tasarrufu için Dış Duvarlarda Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Isıtma Maliyeti İlişkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2006; 21(4):753-758.
- [8] Bolattürk A, Dağdır C. Güneş Radyasyonu Dikkate Alınarak Sıcak İklim Bölgelerindeki Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 2013;33:87-99.
- [9] Kürekçi A, Bardakçı T, Çubuk H, Emanet Ö. Türkiye'nin Tüm İlleri için Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2012; 131:5-21.
- [10] Bektaş V. Binalarda Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [11] Yıldız A, Gürlek G, Erkek M, Özbalta N. Economical and Environmental Analyses of Thermal Insulation Thickness in Buildings. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 2008;28:25-34.
- [12] Kürekçi A, Erdem S. Isıtma ve Soğutma Derece Gün Değerlerinin Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığına Etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2019;172:7-20.
- [13] Gürel AE, Cingiz Z. Farklı Dış Duvar Yapıları için Optimum Isı Yalıtım Kalınlığı Tespitinin Ekonomik Analizi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2011;15(1):75-81.
- [14] Gürel AE, Çay Y, Taşdemir A, Küçükülahlı E. Karabük için Dış Duvar Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufu ve Hava Kirliliğine Etkileri. Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi 2012; (1)4: 402-414.
- [15] Cerit B, Yılmaz B. Isı Yalıtımlı Düşük Enerjili Binalar ve Çevre Kirliliğine Etkileri. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi; 2005; Antalya;625-633.
- [16] Çamur C. Isı Yalıtım Malzemelerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemiyle Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [17] Kaya U, Türkeri N. Dış Duvar Sistemlerinde Kullanılan Yapı Malzemelerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. 5. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu; 15-16 Nisan 2010; İzmir:1-8.
- [18] Evin D, Uçar A. Energy Impact and Eco-Efficiency of the Envelope Insulation in Residential Buildings in Turkey. Applied Thermal Engineering 2018; 154:573-584.
- [19] Dylewski R, Adamczyk J. Optimum Thickness of the Thermal Insulation Layer from the Economic and Ecological Perspective, 4th International Conference On Building Energy Environment; 5-8 February 2018; Melbourne Australia Avustralya. 91-96.
- [20] Kürekçi NA, Özcan M. A Practical Method for Determination of Economic Insulation Thickness of Steel, Plastic and Copper Hotwater Pipes. Journal of Thermal Engineering 2020; 6 (1):72-86.
- [21] Dombaycı ÖA, Gölcü M, Pancar Y. Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. Applied Energy 2006; 83:921-928.
- [22] Yu J, Yang C, Tian L, Liao D. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. Applied Energy 2009;86(11):2520- 2529.
- [23] Mishra S, Usmani J, Varshney S. Optimum insulation thickness of building walls for energy saving. International Journal of Engineering Sciences And Management 2012;2(1):88-95.
- [24] Sancaktar O. Binalarda ısıtma performansının örnek bir uygulama üzerinden incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 2015.
- [25] Yılmaz A. Apartmanların dış kabağuna uygulanan ısı yalıtımının bina enerji performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [26] Atmaca U. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler, Tesisat Mühendisliği Dergisi 2016; 154: 21- 35.
- [27] <https://csb.gov.tr>. Erişim tarihi 13 Nisan 2020.
- [28] <https://www.igdas.istanbul/yakit-fiyatlari-karsilastirmasi>. Erişim tarihi 25 Haziran 2020.
- [29] Ceylan N. Türkiye'de Konut Dış Duvar Sistemlerinde Gerçekleştirilen Isı Yalıtımı Uygulamalarının Üretim Ve Yapım Süreçlerinin Çevresel Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

- [30] Tolun M. Farklı Derece-Gün Bölgeleri İçin Yalıtım Probleminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 2010.
- [31] Devlet Meteoroloji Ofisi. [www.dmi.gov.tr](http://www.dmi.gov.tr) . Erişim tarihi 25 Ocak 2024.



## 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin (Mw 6,0) Bölgesel Sismisite ve Kuvvetli Yer Hareketleri Açısından Değerlendirilmesi

Erdem BAYRAK<sup>1,2\*</sup>, Kaan Hakan ÇOBAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Deprem Araştırma Merkezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

<sup>3</sup> Jeofizik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

\*<sup>1</sup> erdmbyrk@gmail.com, <sup>3</sup> h.coban@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 01/02/2024;

Kabul/Accepted: 30/08/2024)

**Öz:** Düzce ili Gölyaka ilçesinde 23 Kasım 2022 tarihinde TSİ 04:08'de moment büyüklüğü (Mw) 6,0 olan orta büyüklükte bir deprem meydana gelmiştir. Deprem başta Düzce ili olmak üzere Karadeniz, Marmara ve İç Anadolu bölgelerinde de şiddetli bir şekilde hissedilmiştir. Orta büyüklükte meydana gelen bu deprem sonucunda en büyük yer ivmesi yaklaşık 14 km uzaklıktaki 8105 istasyonunun Doğu-Batı bileşeninde 592 gal olarak kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak 2022 Düzce depremi öncesi bölgede meydana gelen depremlerin zamansal ve mekânsal değişimi incelenmiştir. Anaşok sonrası meydana gelen artçı şoklar ise Gutenberg-Richter ilişkisi yardımı ile incelenerek bölgenin depremselliği ortaya konulmuştur. Daha sonra, yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan en büyük yer ivmeleri ile kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen en büyük yer ivmeleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca ivme kayıtlarından elde edilen tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre elde edilen tasarım tepki spektrumları karşılaştırılmıştır. Bazı istasyonlarda elde edilen en büyük ivme değerlerinin yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan ivme değerlerini aştığı gözlenmiştir. İvme kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının da Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre hesaplanan tasarım spektrum seviyelerini aştığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Düzce depremi, kuvvetli yer hareketi, tepki spektrumu, yer hareketi tahmin denklemleri, gutenberg-richter ilişkisi

## Evaluation of 23 November 2022 Düzce Earthquake in terms of Regional Seismicity and Strong Ground Motions

**Abstract:** The earthquake with a moment magnitude (Mw) of 6.0 occurred in Gölyaka district of Düzce province at 04:08 on November 23, 2022. The earthquake was strongly felt mainly in Düzce province, but also in the Black Sea, Marmara and Central Anatolia regions. As a result of this moderate magnitude earthquake, the peak ground acceleration was recorded as 592 gal at the East-West component of station 8105, about 14 km away. Firstly, the temporal and spatial variation of earthquakes occurring in the region before the 2022 Düzce earthquake was analyzed. Aftershocks occurring after the mainshock were analyzed with the help of the Gutenberg-Richter relationship and the seismicity of the region was revealed. The peak ground accelerations obtained from ground motion prediction equations are compared with the peak ground accelerations recorded at strong ground motion stations. In addition, the response spectra obtained from the acceleration records are compared with the design response spectra obtained according to the Turkish Building Earthquake Code. It was observed that the maximum acceleration values obtained at some stations exceeded the acceleration values calculated with the ground motion prediction equation. It was also observed that the response spectra obtained from the acceleration records exceeded the design spectrum levels calculated according to the Turkish Building Earthquake Code.

**Key words:** Düzce earthquake, strong ground motion, response spectrum, ground motion prediction equation, gutenberg-richter relation.

### 1. Giriş

Dünyadaki en aktif sismik kuşaklardan olan Alp-Himalaya kuşağının bir parçası da Türkiye'dir. Türkiye ve civarı genel olarak yüksek depremsellik seviyesine sahiptir ve bu bölgede tarih boyunca yıkıcı ve hasar yapıcı depremler meydana gelmektedir. Özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca hasar verici depremler meydana gelmektedir. Bu nedenle araştırmacılar bu iki aktif tektonik birim başta olmak üzere Türkiye için sismik tehlikeyi değerlendiren birçok çalışma yapmıştır [1-12]. Bu depremlerin son örneği ise 2023 Şubat ayında meydana gelen ve ülkenin büyük bir bölümünü etkileyen Mw 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremleridir.

\* Sorumlu yazar: [erdmbyrk@gmail.com](mailto:erdmbyrk@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9907-1463, <sup>2</sup> 0000-0001-8034-1486

Düzce kenti ana kayadan uzak bir konumda bulunan ovada yerleşmiştir. Akarsu, kanal ve taşkın ovası çökel alanları üzerinde bulunmakta ve genişlemektedir. Düzce havzasındaki anakaya derinliğinin yaklaşık 260 m civarında olduğu belirlenmiştir [13]. Düzce ve yakın civarındaki en yaşlı birim Düzce ovasının güney batısında Prekambriyen yaşlı meta-granotoyitlerdir [14]. Düzce Fayı, bu birimler ile Kuvaterner alüvyonlar arasındaki sınırı oluşturmaktadır.

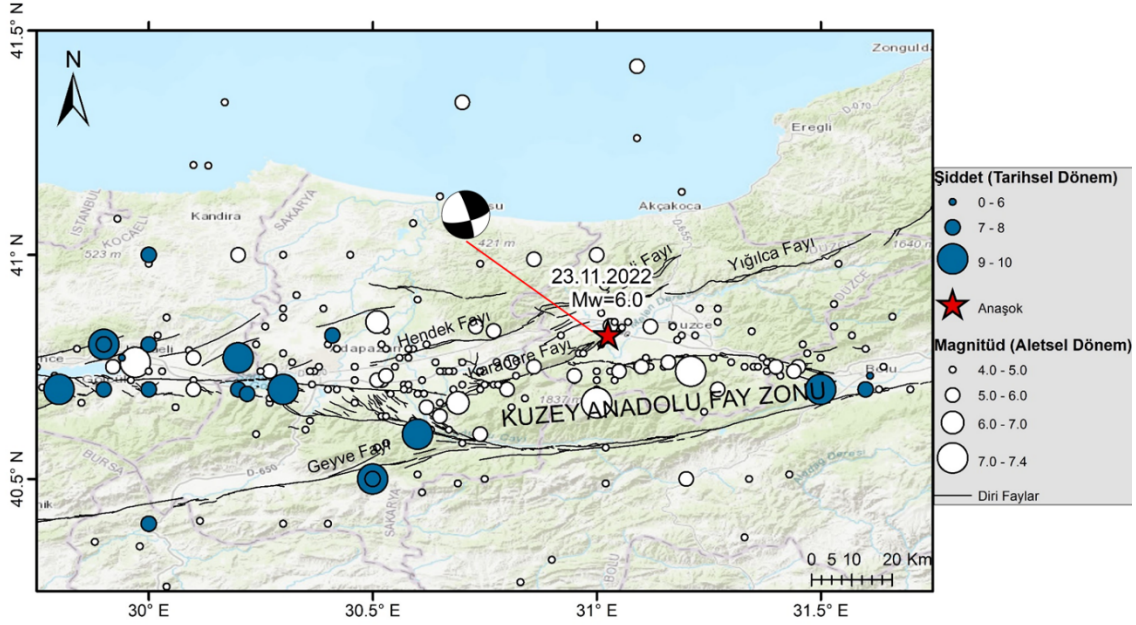
Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI)'ne göre Düzce Gölyaka'da 23.11.2022 tarihinde yerel saat ile 04:08'de Mw 6,0 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Depremin merkez üssüne göre depreme kaynaklık eden fayın KAFZ 'ın bir parçası olan ve yaklaşık 40 km'lik uzunluğa sahip Karadere fayı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1). Deprem odak mekanizması çözümlerine göre fayın sağ yönlü doğrultu atımlı olduğu görülmektedir. Deprem başta Düzce olmak üzere Marmara, Batı Karadeniz ve İç Anadolu bölgesinde bulunan birçok ilde hissedilmiş ve paniğe neden olmuştur. Deprem episantrına en yakın konumda bulunan Düzce ilinde hayatını kaybeden vatandaş bulunmazken yaklaşık 40 vatandaşın ise deprem nedeni ile yaralandığı Düzce Valiliği tarafından açıklanmıştır (<http://www.duzce.gov.tr/12-kasim-duzce-depremi>). Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre Düzce ilinde 475 yıllık geri dönüş periyoduna göre beklenen en büyük yer ivmesi değerleri yaklaşık 0,6 g civarındadır. Bu da bölgenin sismik açıdan oldukça tehlikeli olduğunu ve deprem risk azaltma çalışmalarının ivedilikle yapılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu çalışmanın ana amacı Düzce depreminin etki ettiği alanda bulunan kuvvetli yer hareketi verilerinin incelenmesidir. Çalışmanın ilk aşamasında Düzce ve civarının sismisitesi (deprenselliği) Gutenberg-Richter ilişkisi kullanılarak irdelenmiştir. Daha sonra depreme en yakın konumda bulunan 10 adet kuvvetli yer hareketi istasyonundaki ivme verileri üzerinden araştırmalar yapılmıştır. Deprem sonucu istasyonlarda kaydedilen ivme değerleri ile yer hareketi tahmin denklemlerinden (YHTD) elde edilen ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki tasarım spektrumları karşılaştırılmıştır.

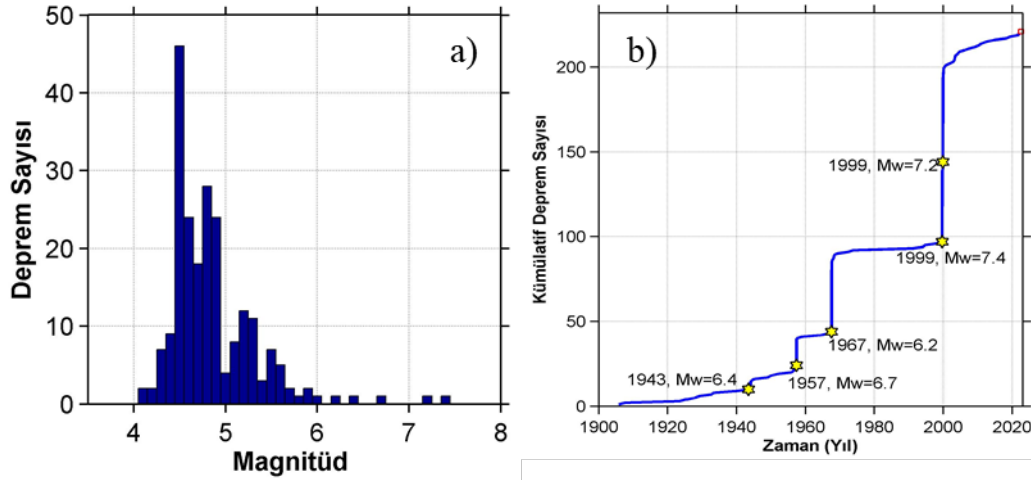
## 2. Çalışma Alanı Deprenselliği

KAFZ, batıda Saros Körfezi'nden doğuda Karlıova ilçesi yakınlarına kadar yaklaşık 1200 km boyunca uzanan ve Türkiye'nin Karadeniz kıyısına yaklaşık paralel bulunan sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur [13]. KAFZ boyunca son yüzyılda 1939 Erzincan depremi (Ms 7,9) ve 1999 İzmit depremi (Mw 7,4) gibi hasar yapıcı çok sayıda deprem meydana gelmiştir. 1999 İzmit depremi sonucunda KAFZ boyunca beş farklı segmentin kırıldığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir [15-17]. Karadere segmenti bu 5 segmentin en doğusunda bulunmaktadır ve diğerleri gibi genel olarak D-B yerine K65°D eğilimli olmasıyla farklılık göstermektedir. Karadere segmentinde ölçülen sağ yönlü yer değiştirmeler, maksimum 2,3 m ile D-B eğilimli segmentlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir [18-19]. Düzce depremi olasılıksal sismik tehlike analizi yardımı ile değerlendirilmiştir [20]. Yaptıkları çalışmada Düzce merkez için DD-2 tasarım seviyesi için 0,5-0,7g arasında değişen ivme değerleri beklendiği sonucuna varmışlardır.

Çalışma alanında 1900 tarihinden ana şokun meydana geldiği 23.11.2022 tarihine kadar  $M \geq 4$  olan depremler B.Ü. Kandilli Rasathanesi Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM) Deprem Sorgulama Sistemi'nden elde edilmiştir. Deprem ajansları depremlerin magnitüd türlerini Mb, Ms, Ml, Md veya Mw olarak hesaplamakta ve kullanıma sunmaktadırlar. B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınan deprem verileri de farklı magnitüd türlerini içermektedir. Depremlerin aynı magnitüd türüne dönüştürülmesi katalogun homojenleştirilmesi olarak bilinmektedir. Bu amaç için [21] tarafından geliştirilen magnitüd dönüştürme denklemleri kullanılarak katalog moment magnitüdü (Mw) türünden homojen hale getirilmiştir. Homojenleştirilen kataloga göre çalışma alanında aletsel dönemde büyüklükleri 4 ile 7,4 arasında değişen toplam 221 adet deprem meydana gelmiştir (Şekil 1). 1900 yılından itibaren meydana gelen depremlerin büyüklüklerinin çoğunlukla 5'den küçük olduğu gözükmektedir (Şekil 2a). Magnitüdü 6 ve daha büyük depremler ise daha nadir olmaktadır. Kümülatif deprem sayısı grafiğine göre deprem sayısındaki artışlar genellikle 6 ve daha büyük magnitüdü depremlerden sonra olmuştur (Şekil 2b).



**Şekil 1.** Çalışma alanı ve civarının depremselliği (Beyaz renkli yuvarlaklar aletsel dönem depremlerini (>1900) ifade etmektedir ve B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Mavi yuvarlaklar ise tarihsel dönem depremlerini (<1900) simgelemektedir ve AFAD-Tarihsel Dönem Deprem kataloğundan alınmıştır. Deprem odak mekanizması da AFAD Odak Mekanizma Çözümleri kataloğundan alınmıştır. Faylar [22] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).



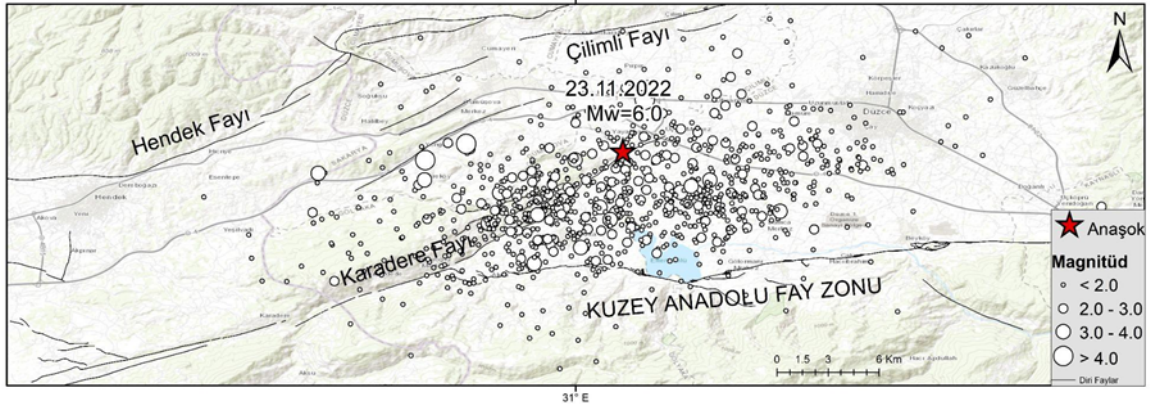
**Şekil 2.** a) Magnitüd-Deprem Sayısı histogramı b) Yıl-Kümülatif deprem sayısı grafiği.

### 3. Bulgular

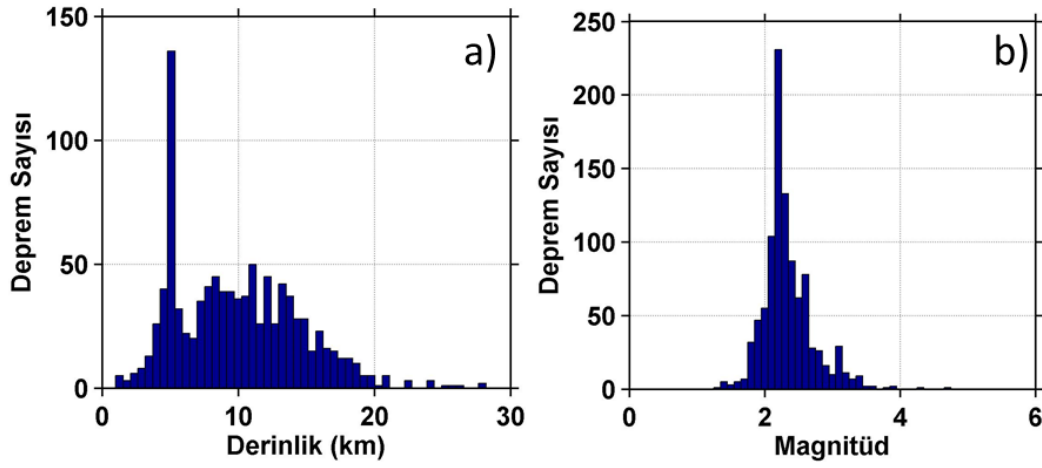
#### 3.1. Artçı şok istatistiği

Anaşokun meydana geldiği 23.11.2022 tarihinden 28.12.2023 tarihine kadar geçen sürede toplam 995 adet deprem meydana gelmiştir (KOERİ, Şekil 3). Meydana gelen depremler genel olarak Karadere Fayı üzerinde dağılım göstermektedir. Artçı katalog homojenleştirilmesi için yine [21] tarafından belirlenen denklem kullanılmıştır. Artçı şokların derinlikleri genellikle 20 km'den daha sığ ve magnitüdülerinin de 3'ten küçük olduğu görülmektedir (Şekil 4).



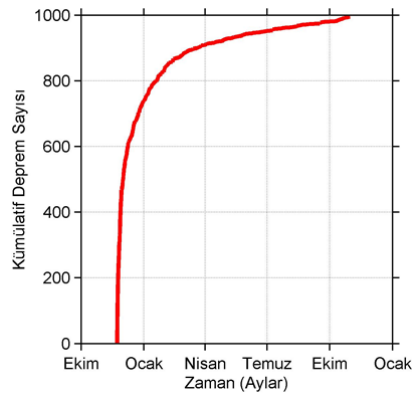


Şekil 3. Anaşoktan sonra 28.12.2023 tarihine kadar meydana gelen depremlerin episantr dağılımı (Deprem verileri B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Faylar [22] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).



Şekil 4. a) Derinlik-deprem sayısı histogramı b) Magnitüd-deprem sayısı histogramı (Zmap programı kullanılarak hazırlanmıştır).

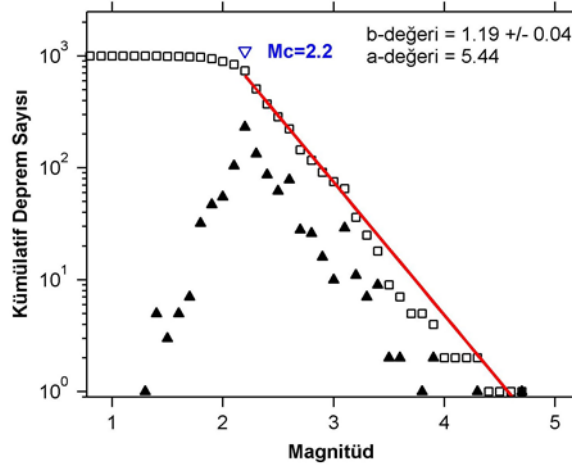
Şekil 5'te verilen zaman-kümülatif deprem sayısı grafiği incelendiğinde, artçı şokların sayısının Şubat ayına kadar artış gösterdiği fakat bu tarihten itibaren azalmaya başladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Zaman-kümülatif deprem sayısı grafiği (Zmap programı kullanılarak hazırlanmıştır).

### 3.2. Gutenberg-Richter ilişkisi

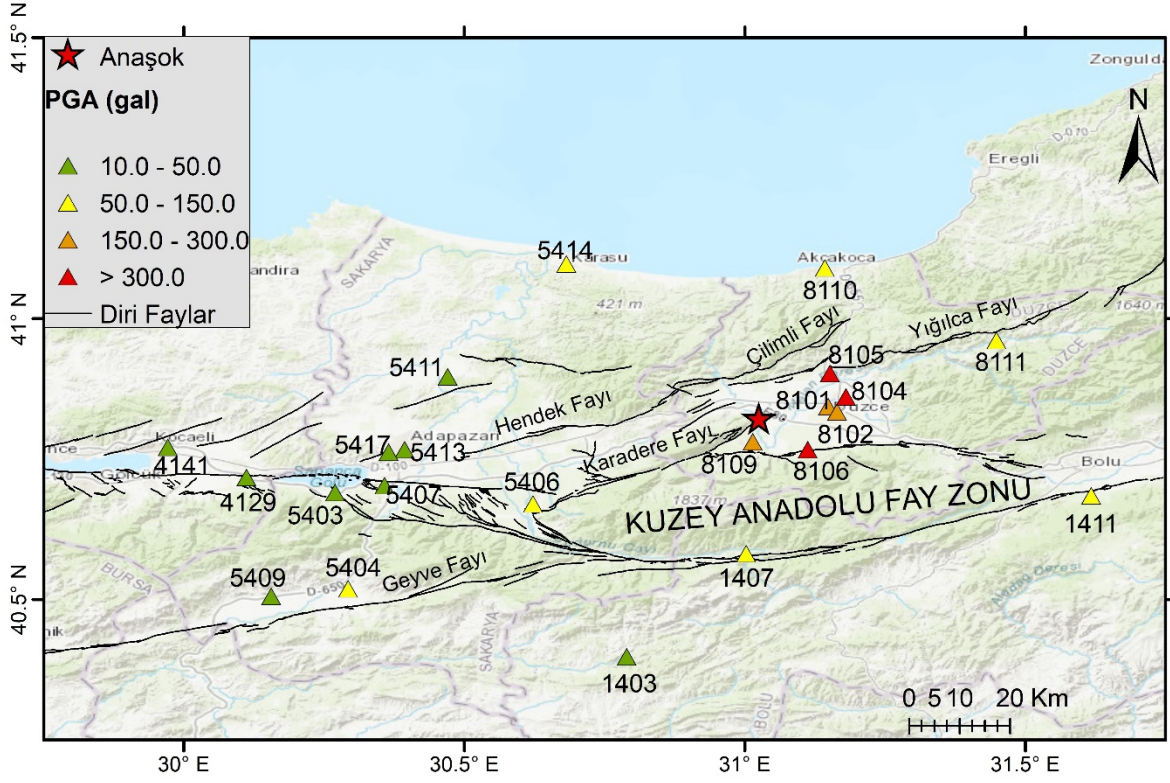
Magnitüd-frekans bağıntısı olarak da bilinen Gutenberg-Richter yasası [23]  $\log N = a - bM$  denklemi ile gösterilmektedir. Bu denklemin doğrudan deprem oluşumunun fiziki ile ilgili olduğu belirtilmiştir [24]. Denkleminde,  $M$ ; Magnitüdü,  $N$ ; kümülatif deprem sayısını,  $a$  ve  $b$  sabit regresyon katsayılarını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda  $b$ -değerinin birçok farklı parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bunlardan başlıcaları;  $b$ -değerinin gerilme seviyesi ile ters orantılı [25-26], fayın heterojenitesi ile doğru orantılı [24], termal sıcaklık ile doğru orantılı [27] olması, artçı şoklarda yüksek  $b$ -değeri gözlenirken bunun aksine öncü şoklarda ise düşük  $b$ -değeri gözlemlendiği rapor edilmiştir [28]. Sonuç olarak, düşük  $b$ -değerinin yüksek gerilme, düşük P-dalga hızı, düşük heterojenite ile ilişkili olduğu söylenebilir. Artçı şok kataloğu kullanılarak Zmap programı [29] ile  $b$ -değeri hesaplanmıştır. Artçı şok kataloğu için  $b$ -değeri 1,19 ve  $a$ -değeri ise 5,44 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).  $b$ -değerinin global ortalama olan 1,0 değerinden daha büyük olduğu ve bu değer de düşük gerilim seviyesini işaret ettiği sonucuna varılmıştır [7, 28].



Şekil 6. Gutenberg-Richter ilişkisine göre hesaplanan  $b$ -değeri grafiği (Siyah üçgenler deprem sayısını, kare şekiller kümülatif deprem sayısını, mavi ters üçgen  $M_c$  değerini ifade etmektedir).

### 3.3. İvme kayıtlarının değerlendirilmesi

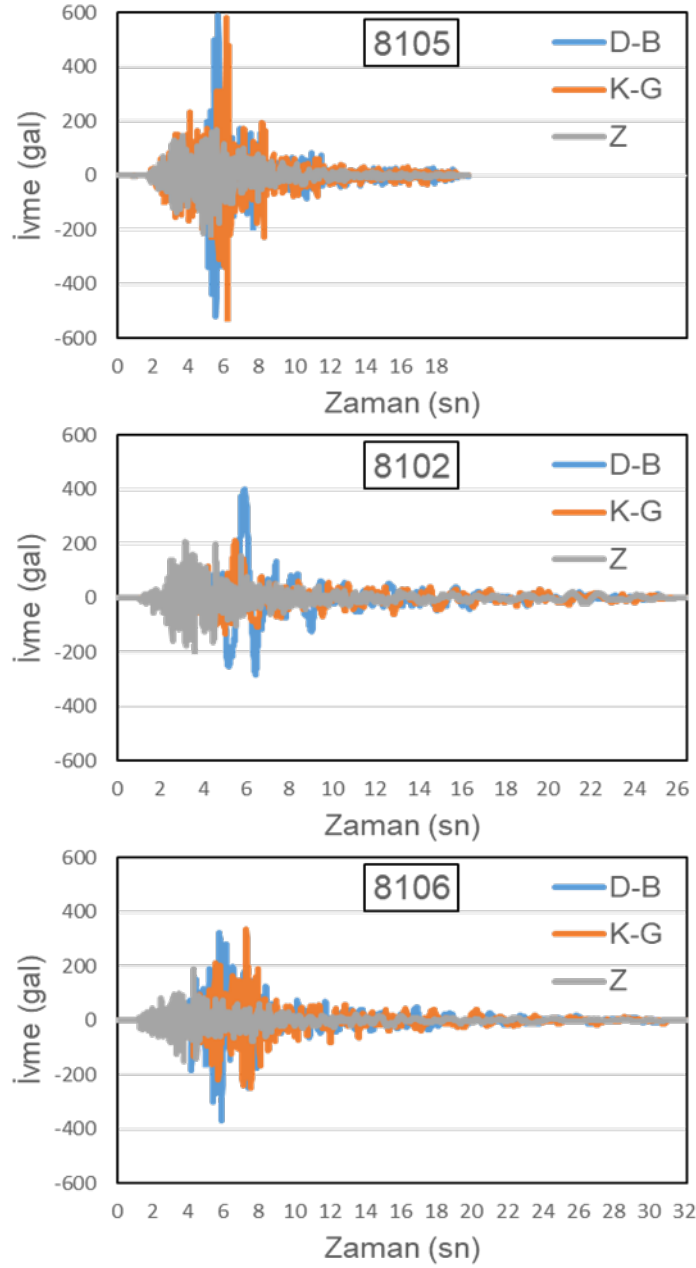
23.11.2022 tarihinde Düzce'de meydana gelen  $M_w$  6,0 büyüklüğündeki deprem çok sayıda kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmiştir. En büyük yer ivmesi 10 gal ve üzeri olarak kaydedilen istasyonların dağılımı Şekil 7'de ve 100 gal ve üzeri olan istasyonlara ait bilgiler ise Tablo 1'de gösterilmiştir. Deprem sonucunda en büyük yer ivmesi deprem episantrına yaklaşık 14 km uzaklıkta bulunan 8105 kodlu istasyonun D-B bileşeninde 592 gal ([www.tadas.afad.gov.tr](http://www.tadas.afad.gov.tr)) olarak kaydedilmiştir (Şekil 8). Aynı istasyonun K-G bileşeninde 582 gal ve Z bileşeninde ise 213 gal olarak kaydedilmiştir (Tablo 1). 8102 kodlu istasyonun D-B bileşeninde en büyük yer ivmesi yaklaşık 400 gal olarak kaydedilmiştir. İvme değerleri incelendiğinde Düzce ve civarındaki istasyonlarda 150 gal'den daha büyük değerler gözlenmiştir. Kocaeli ve Sakarya'da bulunan istasyonlarda ise en büyük yer ivmesi değeri 50 gal'den daha küçük olarak elde edilmiştir (Şekil 7). Tablo 1 incelendiğinde, özellikle deprem episantrına 15 km den daha yakın konumda olan istasyonlarda en büyük yer ivmesi değerlerinin 300 gal den daha büyük olduğu görülmektedir. Düşey bileşenlerdeki en büyük ivmesi değerleri yatay bileşenlerdeki en büyük yer ivmesi değerlerinden yaklaşık iki kat daha küçük olarak elde edilmiştir (Tablo 1). Depremin ivme değerinin en yüksek kaydedildiği 3 istasyona ait ivme verileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Yatay bileşenlerde yüksek ve düşey bileşende ise daha düşük ivme değerleri her üç istasyondaki kayıta da görülmektedir.



Şekil 7. Depremi kaydeden ivme istasyonlarının dağılımı (İstasyon bilgileri [tadas.afad.gov.tr](http://tadas.afad.gov.tr)'den alınmıştır. Faylar [20] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).

Tablo 1. İvme değerinin 100 gal ve daha büyük olarak kaydedildiği istasyonlara ait bilgiler.

Kod	İl	İlçe	PGA K-G	PGA D-B	PGA Z	Repi	Vs30 (m/sn)
8105	Düzce	Düzce Merkez	582	592	212	14	853
8102	Düzce	Düzce Merkez	213	403	208	12	280
8106	Düzce	Düzce Merkez	336	371	191	10	338
8104	Düzce	Düzce Merkez	353	367	227	14	398
8109	Düzce	Gölyaka	265	357	237	5	183
8101	Düzce	Düzce Merkez	246	306	215	11	282
8110	Düzce	Akçakoca	104	151	63	31	407
1411	Bolu	Bolu Merkez	91	141	50	52	229
1407	Bolu	Mudurnu	140	99	67	27	273



**Şekil 8.** Düzce depreminin 8105, 8102 ve 8106 kodlu istasyonlardaki ivme kayıtları (Deprem kayıtları [tadas.afad.gov.tr](https://tadas.afad.gov.tr) adresinden elde edilmiştir).

### 3.3.1. Yer hareketi tahmin denklemleri (YHTD) açısından değerlendirme

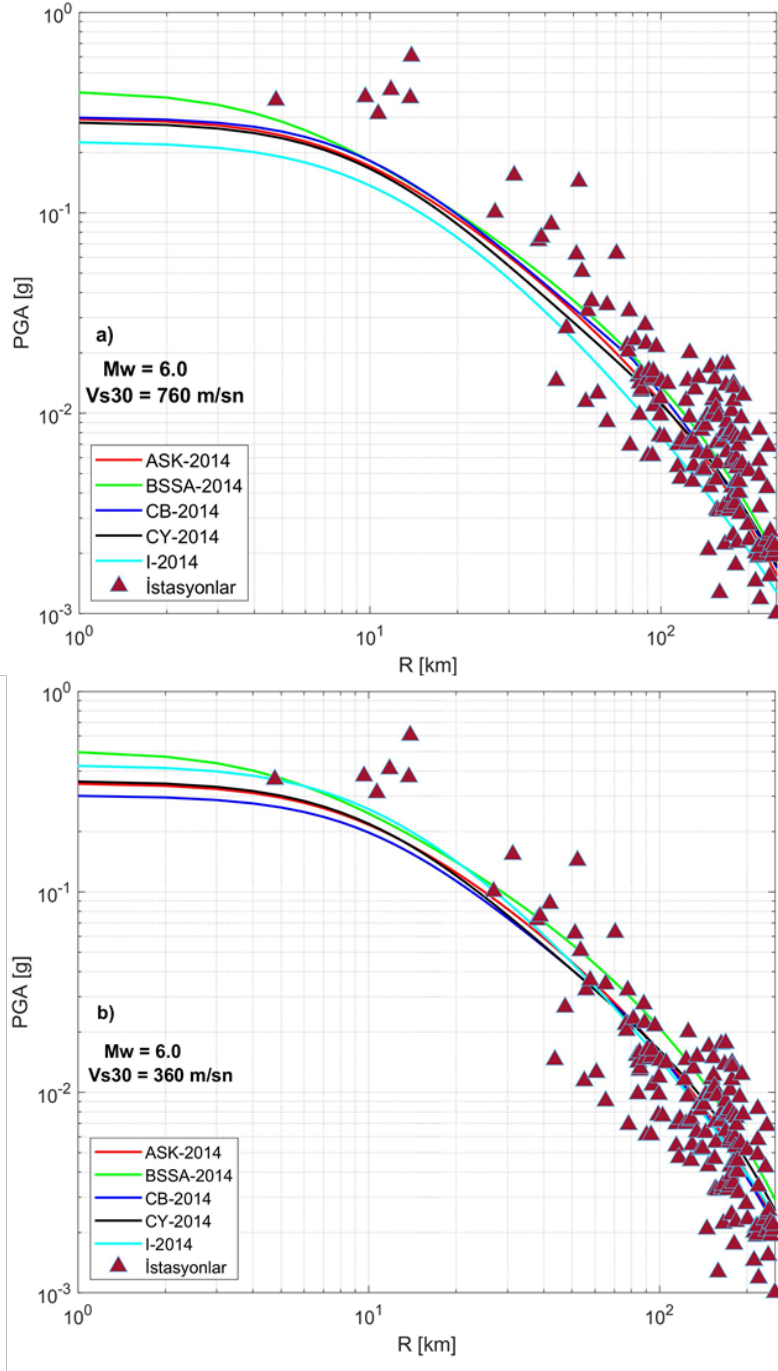
Kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri ile YHTD'den elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için 2014 yılında farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen yeni nesil YHTD'ler kullanılmıştır. Bu tahmin denklemleri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından geliştirilen Next Generation Attenuation (NGA) modelleri olarak bilinmektedir (ASK14 [30], BSSA14 [31], CB14 [32], CY14 [33], I14 [34]). Bu çalışma kapsamında, AFAD tarafından işletilen ve 2022 Düzce depremini kaydeden kuvvetli yer hareketi istasyonlarındaki PGA değerleri ile bu YHTD'den elde edilen değerler karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Deprem konumu ile istasyonlar arasındaki uzaklığın belirlenmesinde farklı uzaklık tanımlamaları bulunmaktadır. Bunlar episantr uzaklığı (R<sub>epi</sub>), Joyner-Boore uzaklığı (R<sub>jb</sub>) ve fay kırığına en yakın uzaklık (R<sub>rup</sub>) olarak söylenebilir. Düzce depremi için fay modeli çözümü yapılmadığı için

kullanılan YHTD’lerde Repi uzaklığı kullanılmıştır. Depremin derinliği ise 11 km olarak hesaba katılmıştır. Bu tahmin denklemlerinde yerel zeminin PGA üzerindeki etkisini belirlemek için Vs30 değeri kullanılmaktadır. Vs30 değeri 360 m/sn ve 760 m/sn varsayımı yapılarak iki farklı durum için uzaklık-PGA değerleri elde edilmiştir. Yerel zemin özelliklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan parametrelerden biri Vs30 değeridir. TBDY’de yerel zemin özelliklerinin belirlenmesinde Vs30 değerini kullanılmaktadır. Vs30 değerine göre yapılan sınıflandırmada hız değeri 360 m/sn’de daha düşük olduğu zaman gevşek birimleri ve 760 m/sn’den daha büyük olduğu zaman daha sağlam zeminleri ifade etmektedir. Bu nedenle Vs30 değeri için 360 m/sn ve 760 m/sn değerleri seçilmiştir. Vs30 değerlerinin seçilmesinde Vs30=760 m/sn varsayımı ile yapılan hesaplamada deprem episantrına 40 km’den daha yakın olan istasyonlarda YHTD’e göre daha yüksek PGA değerleri gözlenmiştir (Şekil 9a). Uzaklık arttıkça istasyonlarda kaydedilen ivme değerleri YHTD ile elde edilen ivme değerlerine yaklaşmaktadır. Bu durumun başlıca nedeni olarak deprem kaynak parametreleri ve YHTD özelliklerinin olduğu söylenebilir. Özellikle YHTD’ler deprem-istasyon arası uzaklıklarının çok yakın olması durumunda başarılı sonuçlar verememektedir. BSSA14 denklemi kullanılarak elde edilen ivme değerlerinin yakın mesafede kaydedilen ivme değerine daha uyumlu olduğu görülmesine rağmen aralarındaki fark nispeten yüksektir. Vs30=360 m/sn varsayımı ile yapılan hesaplamada deprem episantrına en yakın konumda bulunan istasyonda (8109, Repi = 5 km) kaydedilen değere en yakın hesaplama BSSA14 ve I14 denklemleri ile elde edilmiştir (Şekil 9b). Deprem episantrına 20 km’den daha yakın konumda bulunan istasyonlarda gözlenen PGA değerleri YHTD ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. Daha uzak mesafelerde ise Vs30=360 m/sn varsayımına göre yapılan hesaplama göre YHTD’e daha uyumlu değerler elde edilmiştir.

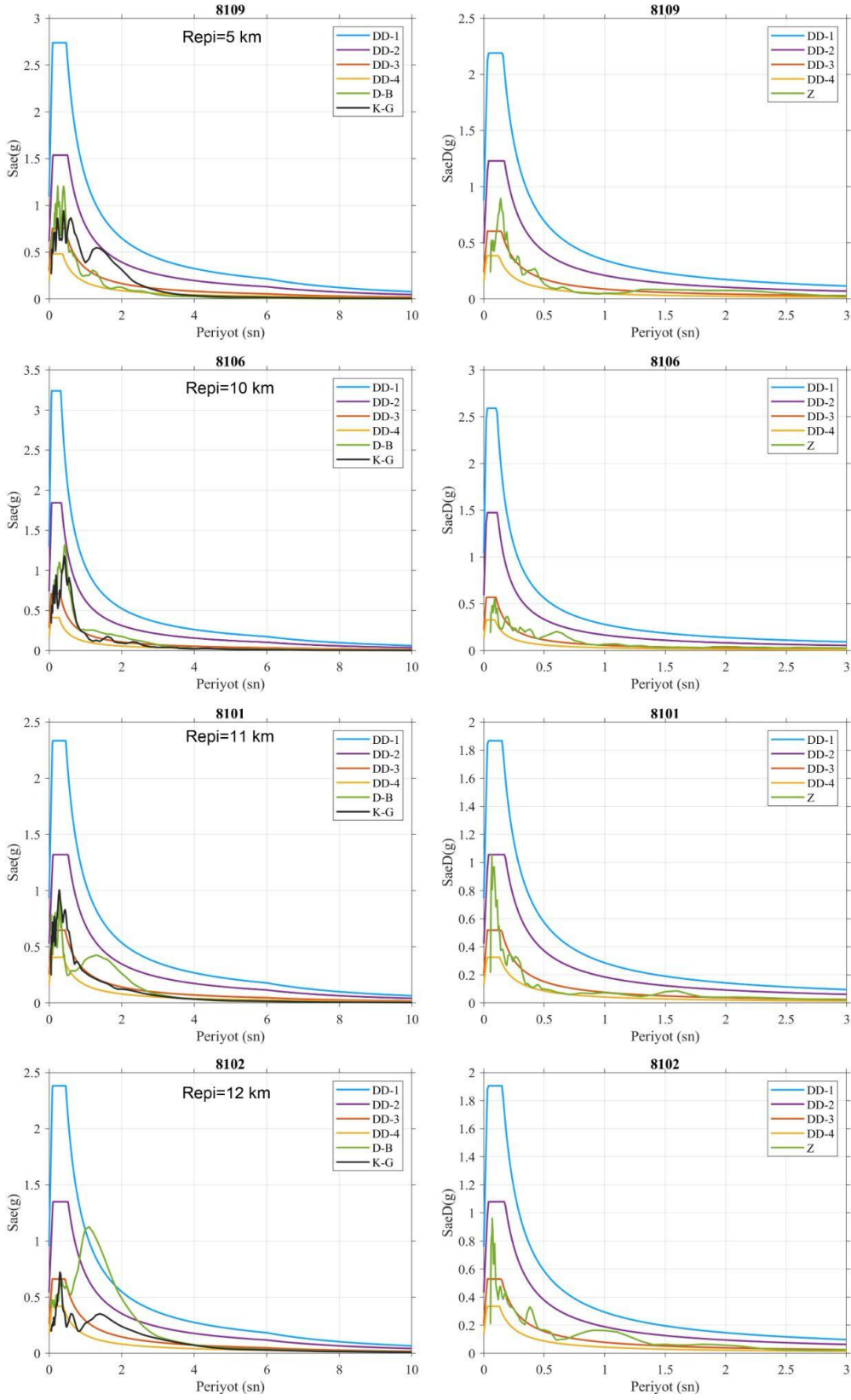
### 3.3.2. Tepki spektrumları

Tepki spektrumları, yapıların depremler sırasındaki davranışsal etkilerini araştıran bir analiz aracıdır. Bu yöntem, yapıların dinamik özelliklerini nispeten basit bir şekilde araştırmamıza olanak tanır. Buna ek olarak, deprem yer hareketinin mühendislik karakterizasyonu, bir deprem durumunda hasarın sınırlı olmasını ve insan hayatının korunmasını sağlamak için yapıların depreme dayanıklı tasarımı için önemli bir ön koşuldur. Bunun için uluslararası sismik kodlar (Avrupa Eurocode 8, ABD SCE 7-10, İtalyan NTC18, vb.) oluşturulmuştur ve bu kodlar, sismolojik, jeolojik ve jeoteknik parametrelerin bir fonksiyonu olarak elastik tepki spektrumu aracılığıyla yüzeydeki belirli bir noktadaki deprem hareketini tanımlamaktadır. Türkiye açısından Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [35], 2018 yılında yayınlanmış olup, binalar bu sismik koda tanımlanan tasarım spektrumlarına göre inşa edilmektedir. Bu çalışmada TBDY 2018’e göre farklı deprem seviyeleri için oluşturulan tasarım spektrumları (DD1: 50 yılda %2 aşılma olasılığı ve 2475 yıllık tekrarlanma periyodu, DD2: 50 yılda %10 aşılma olasılığı ve 475 yıllık tekrarlanma periyodu, DD3: 50 yılda %50 aşılma olasılığı ve 72 yıllık tekrarlanma periyodu ve DD4: 50 yılda %68 aşılma olasılığı (30 yılda %50) ve 43 yıllık tekrarlanma periyodu) değerlendirme aşamasında kullanılmıştır.

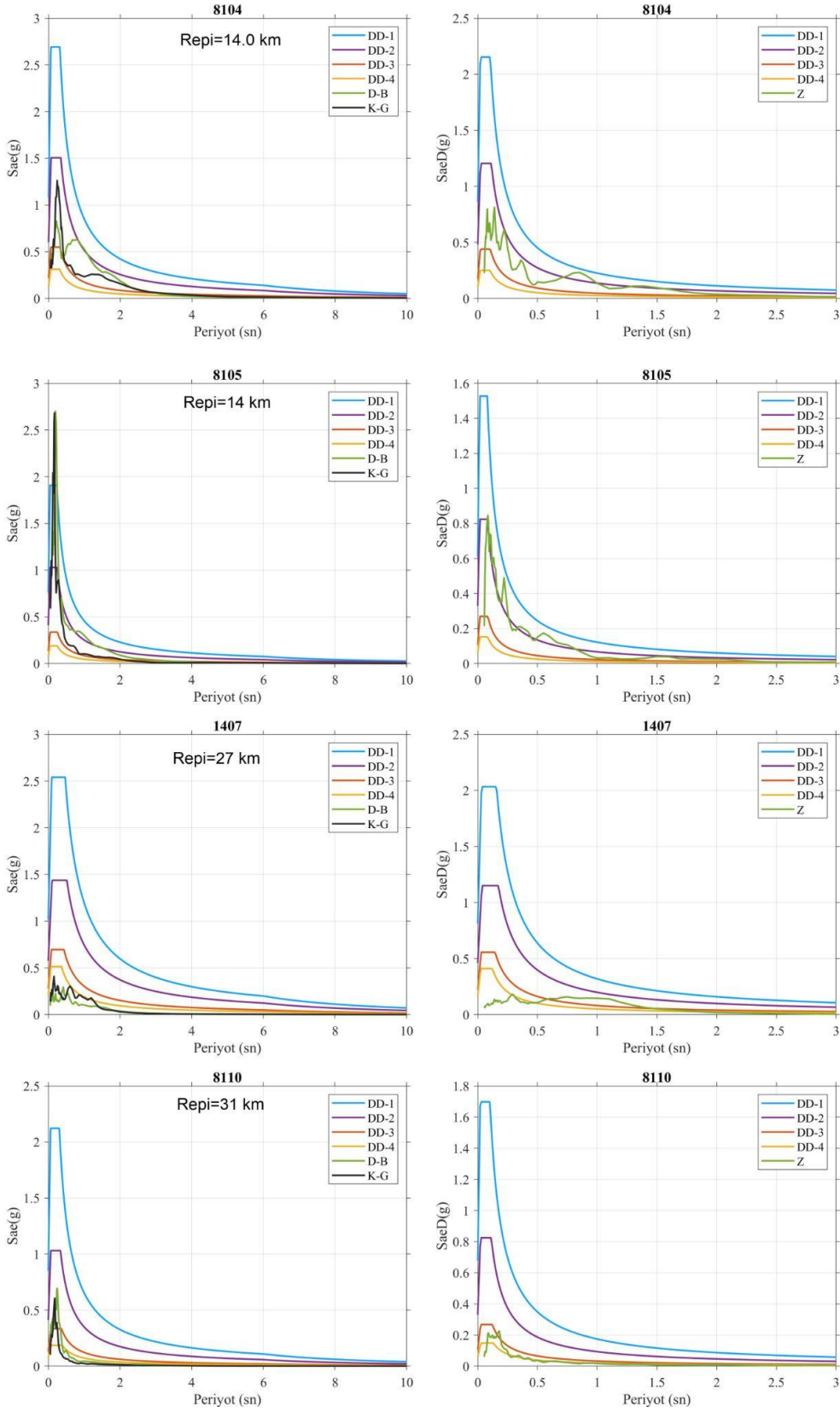
Deprem episantrına yakın konumda bulunan 8 istasyondaki deprem kayıtlarının tepki spektrumları ve TBDY-2018’e göre hesaplanan tasarım spektrumlarının karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 10-11). TBDY-2018’e göre tasarım spektrumu hesaplanırken dört farklı deprem seviyesi de dikkate alınmıştır. Tasarım spektrumu hesaplamasında kullanılan yerel zemin sınıfı ise AFAD tarafından verilen ve Tablo 1’de gösterilen Vs30 değerleri yardımı ile elde edilen zemin sınıfları kullanılmıştır. 8109 ve 8101 kodlu istasyonlarda elde edilen tepki spektrumları DD-3 ve DD-4 tasarım spektrum seviyelerini geçmiştir. 8106 kodlu istasyonda yatay bileşenler (K-G ve D-B) DD-3 ve DD-4’ü geçerken düşey bileşen ise (Z) DD-3 tasarım spektrum seviyesine kadar ulaşmıştır. 8102 kodlu istasyonda özellikle D-B bileşenin yaklaşık 1,5-2 sn periyot aralığında DD-1 spektrum seviyesine kadar ulaştığı diğer bileşenlerin ise DD-3’ü aştığı görülmektedir. 8104 kodlu istasyonda deprem kaydından elde edilen tepki spektrumunun DD-2 tasarım spektrum seviyesine kadar ulaşmaktadır. 8105 kodlu istasyonda ise K-G ve D-B bileşen tepki spektrumlarının DD-1 tasarım spektrum seviyesinin çok üzerinde olduğu Z bileşeninde ise DD-2 seviyesine kadar ulaştığı görülmektedir. 8105 kodlu istasyonun Vs30 değerine göre yerel zemin sınıfının ZB olduğu görülmektedir. Fakat bu tür sağlam zemine göre tepki spektrumunun tasarım spektrumu seviyesini aşmasında deprem kaynak parametrelerinin etkisi olabileceği düşünülmektedir. P-dalgası ilk varışlarına göre yapılan bir çalışmada Düzce depremi anaşokunun doğuya doğru yayıldığı sonucuna varılmıştır [36]. Deprem episantrından uzaklaştıkça tepki spektrum değerlerinin azaldığı ve DD-4 seviyesinin de altında kaldığı görülmektedir (1407 ve 8110 kodlu istasyonlar). Bazı istasyonlarda yüksek PGA ve yüksek tepki spektrumu elde edilmesine rağmen hasarın beklenenden az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak 1999 yılında hem İzmit hem de Düzce’de meydana gelen depremler sonucu yapı stoğunun yenilenmesi olarak düşünülmektedir.



**Şekil 9.** Yer hareketi tahmin denklemleri (YHTD) ile hesaplanan PGA değerleri ile istasyonlarda kaydedilen PGA değerlerinin karşılaştırılması a)  $V_{s30}=760 \text{ m/sn}$  senaryosuna göre yapılan karşılaştırma b)  $V_{s30}=360 \text{ m/sn}$  senaryosuna göre yapılan karşılaştırma.



Şekil 10. TBDY 2018 ve deprem kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırılması.



Şekil 11. TBDY 2018 ve deprem kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırılması.



#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada 23 Kasım 2022 tarihinde TSİ 04:08'de Düzce Gölyaka merkezli meydana gelen depremin (Mw 6,0) bölgeye etkisi incelenmiş ve bölgesel sismisite açısından detaylı değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu bağlamda depremin meydana geldiği bölgede bulunan farklı uzaklıklardaki 10 adet kuvvetli yer hareketi istasyonundaki veriler incelenmiştir. Depremin etkileri bu verilerden elde edilen ivme değerleri ile YHTD ile hesaplanan ivme değerleri karşılaştırılmasıyla ve tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki tasarım spektrumları karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Sismisite açısından artçı şok dağılımı ve Gutenberg-Richter ilişkileri bölgesel olarak değerlendirilmiştir.

Homojenleştirilmiş artçı şok kataloğu kullanılarak Gutenberg-Richter ilişkisinden  $b$ -değeri hesaplanmıştır. Elde edilen  $b$ -değeri yaklaşık 1,12 olup bu değere göre bölgenin gerilim seviyesinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır. En büyük yer ivmesi 8105 kodlu istasyonun D-B bileşeninde 592 gal olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Vs30 değerinin 360 m/sn ve 760 m/sn olması durumuna göre YHTD ile hesaplanan ivme değerlerinin deprem episantırına yakın konumda bulunan istasyonlarda ölçülen PGA değerlerinden daha az olduğu gözlenmiştir. YHTD ile yapılan bu karşılaştırmalarda deprem ve istasyon arasındaki uzaklıklar için episantır uzaklığı kullanılmıştır. BSSA14 denklemiyle hesaplanan ivme değerlerinin yakın mesafede kaydedilen ivme değerlerine daha uyumlu olduğu, mesafe arttıkça diğer denklemlerinde kaydedilen ivme değerlerine yaklaştığı ve uyumlu olduğu gözlenmiştir. Depremin episantır noktasına en yakın olan 8109 istasyonu ivme değerine en yakın BSSA14 ve I14 denklemleriyle hesaplanan ivme değerlerinin yaklaştığı gözlenmiştir. TBDY-2018 tasarım spektrumu ile ivme kayıtlarına ait tepki spektrumlarının karşılaştırılmasında özellikle 8105 kodlu istasyonda tepki spektrumunun DD-1 deprem seviyesine ulaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak meydana gelen orta büyüklükteki 2022 Düzce depreminde kaydedilen ivme değerlerinin ve tepki spektrumlarının tahmin edilenlerden ve yönetmelikten daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun nedenleri arasında yerel zemin özellikleri ve deprem kaynak parametreleri bulunmaktadır. Deprem tehlike haritalarının ve yönetmeliklerin hazırlanmasında özellikle yerel zemin özellikleri ve deprem kaynak parametrelerinin dikkate alınması gerekliliği bir kez daha ortaya koyulmuştur.

#### Teşekkür

Yazarlar editörlere ve hakemlere makaleyi geliştirici yorumlarında dolayı teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışmada deprem verileri B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Tarihsel dönem depremleri, Deprem odak mekanizmaları ve ivmeölçer istasyon bilgileri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD) ve Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (TADAS) üzerinden alınmış ve oluşturulan kataloglardan indirilmiştir. Fay bilgileri Emre vd. 2013' den sayısallaştırılmıştır. Şekil 1 ve 3 ArcMap programı kullanılarak hazırlanmıştır. Yazarlar veri sağlayan tüm kurumlara teşekkür eder. E.B. ve K.H.Ç. fikir sahibi, K.H.Ç. ve E.B. analizleri gerçekleştirdi, E.B. ve K.H.Ç. sonuçları yorumladı, K.H.Ç. ve E.B. makaleyi yazdı.

#### Kaynaklar

- [1] Erdik M, Demircioglu M, Sesetyan K, Durukal E, Siyahi B. Earthquake hazard in Marmara region, Turkey. Soil Dyn Earthquake Eng 2004; 24(8): 605-631.
- [2] Polat O, Gök E, Yılmaz D. (2008). Earthquake hazard of Aegean Extension Region, Turkey. Turk J Earth Sci 2008; 17: 593-614.
- [3] Kinscher J, Krüger F, Woith H, Lühr BG, Hintersberger E, İrmak TS, Barış S. Seismotectonics of the Armutlu peninsula (Marmara Sea, NW Turkey) from geological field observation and regional moment tensor inversion. Tectonophysics 2013; 608: 980-995.
- [4] Bayrak Y, Bayrak E. Regional variations and correlations of Gutenberg-Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. J Asian Earth Sci 2012; 58: 98-107.
- [5] Sayıl N. Evaluation of the seismicity for the Marmara region with statistical approaches. Acta Geod Geophys 2014; 49(3): 265-281.
- [6] Özmen B, Bayrak E, Bayrak Y. An investigation of seismicity for the Central Anatolia region, Turkey. J Seismolog 2014; 18: 345-356.
- [7] Bayrak E, Yılmaz Ş, Softa M, Türker T, Bayrak Y. Earthquake hazard analysis for East Anatolian fault zone, Turkey. Nat Hazard 2015; 76: 1063-1077.
- [8] Çoban KH, Sayıl N. Investigation of the seismicity of East Anatolian fault zone (EAFZ) according to Poisson and Exponential distribution models. Düzce University Journal of Science & Technology 2018; 6(2): 491-500.
- [9] Çoban KH, Sayıl N. Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. J Seismol 2019; 23: 1405-1422.

- [10] Çoban KH, Sayıl N. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones. *Arabian J Geosci* 2020; 13: 971.
- [11] Bayrak E, Çoban KH. Evaluation of 08 August 2019 Bozkurt (Denizli-Turkey, Mw 6.0) earthquake in terms of strong ground-motion parameters and Coulomb stress changes. *Environ Earth Sci* 2023; 82(20): 470.
- [12] Özmen B. Gumbel Uç Değerler Yöntemi ile Ankara İli ve Yakın Çevresinin Deprem Tehlike Analizi. *Resilience* 2023; 7(2): 391-407.
- [13] Özmen B. 2000. Düzce-Bolu Bölgesi'nin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri s:1-14, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu (Editör: Bülent ÖZMEN ve Günruh BAĞCI). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- [14] Şengör AMC, Yılmaz Y. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics* 1981; 75: 181-241.
- [15] Şengör AC, Canitez N. The North Anatolian Fault. *Alpine-Mediterranean Geodynamics*, 1982; 7: 205-216.
- [16] Barka AA, Akyüz HS, Sunal G. vd. The surface rupture and slip distribution of the August 17, 1999 İzmit earthquake, M= 7.4, North Anatolian Fault. *Bull Seismol Soc Am America* 2002; 92: 43–60.
- [17] Emre Ö, Awata Y, Duman TY. (eds) Surface Rupture Associated with the 17 August 1999 İzmit Earthquake. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) Special Publications 2003; 1.
- [18] Duman TY, Awata Y, Yoshioka T, Emre Ö, Dogan A, Ozalp S. Detailed maps and inventories of the 1999 İzmit surface rupture. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) of Turkey, Special Publication Series 2003; 1: 23-28.
- [19] Dikbaş A, Akyüz HS. Paleoseismological investigations on the Karadere segment, North Anatolian fault zone, Turkey. *Turk J Earth Sci* 2011; 20(4): 395-410.
- [20] Okuyan Akcan S, Tekin S, Yeşilyurt A, Zülfiyar AC. Güncel Avrupa Sismik Tehlike ve Risk Modeliyle 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin Değerlendirilmesi. *Afet Ve Risk Dergisi*, 2023; 6(4): 1218-1233.
- [21] Kadrioğlu FT, Kartal RF. The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012). *Turk J Earth Sci* 2016; 25(4): 300-310.
- [22] Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş, Şaroğlu F. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara, Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1, 2013.
- [23] Gutenberg B, Richter CF. Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Am* 1944; 34:185–188.
- [24] Mogi K. Magnitude-Frequency Relationship for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes. *Bull Earthq Eng* 1962; 40:831-853.
- [25] Scholz CH. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull Seismol Soc Am* 1968; 58:399–415.
- [26] Wyss M. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophys J R Astron Soc* 1973; 31:341–359.
- [27] Warren NW, Latham GV. An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity. *J Geophys Res* 1970; 75:4455–4464.
- [28] Suyehiro S, Asada T, Ohtake M. Foreshocks and aftershocks accompanying a perceptible earthquake in central Japan. *Pap Met Geophys* 1964; 15: 71-88.
- [29] Wiemer S A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol Res Lett* 2001; 72(3): 373-382.
- [30] Abrahamson NA, Silva WJ, Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 2014; 30(3), 1025-1055.
- [31] Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, Atkinson GM. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra* 2014; 30(3), 1057-1085.
- [32] Campbell KW, Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra* 2014; 30(3), 1087-1115.
- [33] Chiou BSI, Youngs RR. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 2014; 30(3), 1117-1153.
- [34] Idriss IM. Summary of the IM14 GMPE. *Earthquake Spectra*, 2014; 30.
- [35] TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [36] Martínez-Garzón P, Becker D, Jara J, Chen X, Kwiatak G, Bohnhoff M. The 2022 MW 6.0 Gölyaka–Düzce earthquake: an example of a medium-sized earthquake in a fault zone early in its seismic cycle. *Solid Earth* 2023; 14(10): 1103-1121.



## Güçlendirme İşlerinde Miktar Hatasına Bağlı Dengesiz Teklifin Önlenmesi için Öneriler

Suat TOPUZ<sup>1</sup>, Önder Halis BETTEMİR<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>1</sup> suat\_topuz@hotmail.com, <sup>2</sup> onder.bettemir@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 02/02/2024;

Kabul/Accepted: 31/08/2024)

**Öz:** Yıkıcı 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinin ardından on binlerce orta hasarlı binanın güçlendirilmesi ve az hasarlı binaların tamirata gerçekleştirilmektedir. Güçlendirme ve onarım süreci ihale ve sözleşme üzerine deneyimsiz apartman yöneticileri tarafından yürütüldüğü için deneyimli yükleniciler tarafından sunulabilecek dengesiz tekliflere karşı etkisiz kalılabilmektedir. Ayrıca deprem sonrası bölge halkında oluşan yüksek düzeydeki endişe ve korku nedeniyle yüklenicilerin iş artışı talepleri işveren tarafından kabul edilerek sözleşme bedelinin çok üzerinde iş artışları görülebilmektedir. Bu çalışmada güçlendirme işlerinde dengesiz teklife dayalı olası iş artışlarından dolayı yüklenicilerin haksız kazanç elde etmelerinin önüne geçebilecek revize fiyat uygulamaları önerilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Kamu ihale kanunu eklerinde yer alan revize birim fiyat formülünün dengesiz teklif üzerindeki etkinliği %0 ile %20 iş artışından sonra uygulanma durumu incelenmiştir. Buna ek olarak daha hızlı fiyat eksiltmesi sağlayabilmek için artış oranının üssü alınarak revize birim fiyat formülü modifiye edilmiştir. Modifiye revize fiyat formülünün %0 ile %20 iş artışından sonra uygulanması incelenmiş ve dengesiz teklif sunan yüklenicinin iş artışından dolayı elde edeceği kârı azaltarak iş artışının cazip olmaması amaçlanmıştır. Bununla beraber dengeli teklif veren yüklenicilerin hızlı düşen birim fiyat uygulamasından mağdur olmayacak düzeyde revize birim fiyat uygulanması önerilmektedir. Vaka analizi çalışmasında elde edilen bulgulara göre modifiye revize birim fiyat formülünün %10 iş artışından sonra uygulanmasının dengesiz teklif sunan yüklenicinin aşırı kâr etmesini önlerken dengeli teklif sunan yüklenicinin makul kâr elde edebilmesine olanak verdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada uygulaması kolay ve tarafların haklarını gözeten adaletli bir revize fiyat uygulaması önerilerek güçlendirme işlerinin adil ve güvenli biçimde gerçekleştirilmesinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu sayede dengesiz teklif sunan yükleniciler için iş artışı cazip olmayacak ve iş artışları gerekli haller dışında ortaya çıkmayacağı için deprem sonrası maddi durumu zayıflayan konut sahiplerinin finansal sağlıklarını aşırı etkilemeyecek biçimde güçlendirme işleri gerçekleştirilebilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Dengesiz teklif, birim fiyat, sözleşme yönetimi, iş artışı.

### Suggestions to Prevent Unbalanced Bidding Due to Quantity Error in Retrofit Constructions

**Abstract:** Following the devastating February 6 Kahramanmaraş earthquakes, tens of thousands of moderately damaged buildings were retrofitted and slightly damaged buildings were repaired. Since the retrofit and repair process is carried out by the inexperienced apartment managers on tender and contract management, they may be ineffective against unbalanced offers which may be submitted by experienced contractors. Moreover, contractors can have scope change requests accepted by the job owners and contract price can increase tremendously by abusing the high level of anxiety and fear in the people of the region after the earthquake. In this study, revised price practices that can prevent contractors from gaining excessive profits due to possible quantity increases based on unbalanced bids in retrofit constructions are proposed and the results are evaluated. The effectiveness of the revised unit price formula in the annexes of the public procurement law on the unbalanced bid and its application after a 0% to 20% work increase were examined. Furthermore, in order to achieve faster price decreases, the revised unit price formula has been modified by the power of the rate of increment. The application of the modified revised price formula is examined from 0% to 20% quantity increase. It is aimed to make the quantity increase of the work items unattractive by reducing the profit of the contractor who submitted an unbalanced bid. However, it is also aimed to protect contractors who submit balanced bids and prevent a rapidly falling unit prices which may cause heavy loss. According to the findings obtained in the case study, implementation of the modified revised unit price formula after the 10% work increase prevents the excessive profits of the contractor who prepares an unbalanced bid, while allowing a reasonable profit for the contractor who submits a balanced bid. In this study, it is aimed to ensure that the retrofit works are carried out fairly and safely by proposing a fair revised price application that is easy to implement and respects the rights of the parties. In this way, the job increase will not be attractive to contractors who submit unbalanced bids, and since job increases will not occur except for the necessary cases. Consequently, retrofit constructions will be carried out in a way that will not excessively affect the financial health of homeowners whose financial situation is weakened after the earthquake.

**Key words:** Unbalanced bid, unit price, contract management, quantity increase.

\* Sorumlu yazar: [onder.bettemir@inonu.edu.tr](mailto:onder.bettemir@inonu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0000-3795-4084, <sup>2</sup> 0000-0002-5692-7708

## 1. Giriş

Ülkemizdeki yapıların büyük çoğunluğu yıkıcı depremlere maruz kalabilecek düzeyde riskli bölgelerde bulunmaktadır. Bu nedenle birçok yapının kullanım ömrü boyunca şiddetli depreme maruz kalma olasılığı oldukça yüksektir. Yıkıcı depremlerin ardından gerçekleştirilen hasar tespit çalışmaları sonrası yapılara hasarsız, az hasarlı, orta hasarlı ve ağır hasarlı biçiminde hasar sınıfı atanmaktadır. Hasarsız ve az hasarlı yapılarda resmi olarak onaylanması gereken bir tamirat yapılmasına gerek bulunmamakta, ağır hasarlı binalar ise yıkılmaktadır. Orta hasarlı binalar deprem sonrası görmüş olduğu hasar neticesinde hemen kullanımına izin vermeyecek şekilde hasara uğramış ve giderilmesi gereken yapısal kusurları barındıran bina olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte içerdiği yapısal kusurlar teknik ve ekonomik olarak giderilebilecek boyuttadır. Ayrıca 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'da belirtilen riskli yapılar ile riskli alan ve rezerv yapı alanları kapsamına girmemesi gerekmektedir. Belirtilen koşulları yerine getiren binadaki hak sahiplerinin en az %80'inin onayı ile deprem performans analizi ve ardından güçlendirme süreci yürütülebilir. Orta hasarlı yapıların kullanımına ancak deprem performans analizini yapıp binanın hasar durumu, donatı detayları, malzeme kalitesi ve mevcut statik projesinin değerlendirilmesinin ardından güçlendirme projesi hazırlanmaktadır. Deprem performans analizinin gerçekleştirilmesi Türk Bina Deprem Yönetmeliğinde (2018) tanımlanmıştır. Güçlendirme projesinin hazırlanıp ilgili belediye ve atanmış yapı denetim firması tarafından onaylanmasının ardından uygulanmasına izin verilir. Güçlendirme inşaatına başlamak için güçlendirme inşaatı yapmaya yetkili bir yüklenici ile sözleşme imzalanarak yapım aşamasına geçilmektedir. Binanın güçlendirme inşaatı 4708 sayılı yapı denetimi hakkında kanun uyarınca atanmış yapı denetim firması tarafından denetlenir.

Genel olarak inşaat sözleşmeleri konusunda tecrübesi olmayan yapı sahipleri tarafından değerlendirilen tekliflerde bulunabilecek dengesiz fiyatların ve yol açabileceği olumsuz koşulların fark edilebilmesi çok mümkün değildir. Bu durum inşaat sırasında iş artışına gidilerek sözleşme bedellerinin önemli ölçüde yükselme riskini getirmektedir. Yaşanan 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında gerçekleştirilen konutların güçlendirme inşaatlarında belirtilen risk ve olumsuzluklar yaygın olarak görülmektedir. Güçlendirme işini alan yüklenicilerden bazıları güçlendirme inşaatı sırasında bina sakinlerinin yüksek düzeydeki deprem kaynaklı kaygılarını ve korkularını artırmak için iş artışı sağlamak için yapı ile ilgili tespit ettiği eksiklikleri abartılı biçimde gündeme getirerek iş kalemlerinde artış sağlamaya çalışmaktadır. İhale ve sözleşme yönetimi konusunda yüklenici ile kıyaslandığında deneyim ve bilgi düzeyi çok düşük olan apartman yöneticileri tarafından yürütülen güçlendirme sürecinde çok ciddi iş artışları meydana gelebilmektedir.

Bu çalışmada ihale süreci ve sözleşme konularında deneyimi olmayan bina sakinlerinin işveren konumunda yürütecekleri güçlendirme işlerinde sözleşme ve inşaat işlerinde çok deneyimli müteahhitler tarafından önceden sezilenmiş iş artışlarını dikkate alınarak hazırlanan dengesiz teklif sonucu karşılaşılabilecekleri sorunlara karşı çözüm önerileri getirilmiştir. Önerilen çözümlerin iş artışı gerçekleşme ihtimali yüksek olan güçlendirme inşaatlarının güvenliğinden taviz vermeyecek ve işini dürüst yapan yüklenicileri mağdur etmeyecek boyutta olmasına dikkat edilmiştir.

## 2. Literatür Taraması

Teklif bedeli inşaat maliyetine genel giderlerin ve kârın eklenmesiyle bulunur. İnşaat maliyeti proje ve şartnamelere bakarak oldukça doğru bir şekilde hesaplanabilir ancak genel gider ve kâr miktarının hesaplanması zor olduğu için inşaat maliyetinin belli bir oranı olarak belirlenir. Belirlenen kâr yüzdesi maliyete eklenerek dağıtılır ancak dağıtım iş kalemleri arasında eşit olmazsa dengesiz teklif oluşur. Erken olacak imalatlarla daha fazla dağıtırsa erken ödeme, geç olanlara daha fazla dağıtırsa geç ödeme ve miktar hatası tespit edilen kalemlere yapılırsa miktara bağlı dengesiz teklif oluşur [1]. Dengesiz teklif yeni bir kavram değildir ve bu konu üzerine çalışmalar 50 yıl önce başlamıştır. Dengesiz teklif tüm proje maliyetinin ve kârının, proje teklif bedeli toplamını değiştirmeden projede yer alan iş kalemleri arasında akıllıca dağıtıldığı bir yöntemdir. Erken ya da geç ödeme ile metrajla bağlı olmak üzere iki ana grupta toplanırlar. Zamana bağlı dengesiz teklifte yüklenici paranın zaman değerinden faydalanmak amacıyla geç yapılacak imalat kalemlerinin tutarını azaltıp erken başlayan işlerin tutarlarını artırır. Bu durum "Erken Ödeme" olarak tanımlanmaktadır.

Metrajla bağlı dengesiz teklifte ise imalat kalemlerinin projeden hesaplanan metrajlarına göre gerçekleştirilen miktarlarında artma ve/veya azalma beklentisine dayanarak birim fiyatlar yüklenici tarafından ayarlanır. Yüklenici işverenin hazırladığı metrajda öngörülen değerlerin gerçekleştirilecek miktardan daha az olacağını düşünürse bu kalemlere fazla teklif vererek daha fazla kâr etmek isteyebilir. Yükleniciler özellikle fazla kâr edeceği iş kalemlerinin miktarını arttırmak için işi aldıktan sonra projede revize talep etmektedir. Bu durum "metraj hatası istisması" ya da "bireysel oran yüklemesi" olarak tanımlanır.

Dengesiz teklif alanındaki ilk çalışmalar temel olarak Gates ve Friedman tarafından yapılmıştır. Gates 1959 yılında büyük ölçüde dengesiz teklif olasılığını belirlemek için alternatif bir matematiksel formül önermeye

odaklanmıştır. Gates'in Friedman'ın 1956 tarihli dengeli teklif modeline bir alternatif sunması ve daha sonra bu modeli matematiğin yanlış kullanımı olarak gördüğü için eleştirmeye başlaması nedeniyle önemli kabul edilmiştir. Gates yaptığı çalışmalarda erken ödeme, geç ödeme ve metraja bağlı ödeme türlerini örnekler vererek tanımlamıştır. Stark [2] dengesiz teklifin tespitine yönelik bir hesaplama örneği vererek erken ödemenin ve miktara bağlı dengesiz teklifin yüklenicilere faydasını değerlendirmiştir. Ashley ve Teicholz [3] miktara bağlı dengesiz teklifin tespit edilmesine yönelik modeller üzerinde çalışmışlardır. Diekmann vd. [4] Stark'ın orijinal deterministik modelini iyileştirerek riski hesaba katmak için olasılık tabanlı bir yaklaşım eklemiştir. Cattell ürün fiyatlandırmasının potansiyel faydalarının üçünü de tanımlamış ve hepsini kapsamlı ve tutarlı bir formülde toplamıştır [5,6]. Tong ve Lu, yalnızca Green tarafından "bireysel oran yüklemesi", Cattell tarafından "beklenen miktar değişim emirleri için yükleme" ve "hatadan yararlanma dengesizliği" olarak adlandırılan avantajı optimize etmeye odaklanan bir yöntem geliştirmiştir [7]. Dengesiz teklif uygulaması yükleniciler için hem tekliflerinden kâr elde etmelerini hem de risklerini en aza indirmelerini sağlar. Bir projeye teklif verirken ön uç yüklemesi, arka uç yüklemesi ve miktar hatası sömürsü olarak nitelendirilebilecek dengesiz teklif türleri yer almaktadır. Bu fırsatlardan herhangi birini örnek olarak tek başına takip etmek sezgisel olarak çok basittir ancak bir projedeki her bir iş kaleminin farklı dengesiz teklif türü içerebileceği için tekliflerin büyük ölçüde benzersiz ve karmaşık bir karışıma sahip olduğu göz önüne alındığında tespiti zor bir durum meydana gelecektir [8].

Dengesiz teklifteki riskler reddedilme riski, tepki riski ve yanlış olma riski olarak sıralanabilir. İşveren tarafından kalem fiyatlarının toplu olarak değerlendirilmesine yönelik teknikler olmadığından tekliflerin kalem kalem değerlendirilmesi yoluna gidilecektir. Bu açıdan değerlendirildiğinde iş kalemi fiyatlarından sadece birinin sifıra kadar düşük ya da makul fiyattan birkaç kat fazla olması teklifin reddedilme riskini doğurduğu varsayılmaktadır. Bunu engellemenin bir yolu her kaleme sezgisel olarak üst ve alt fiyat belirlemektir. Ayrıca mantık olarak bazı kalemlerin diğerlerinden yüksek olması beklenmektedir. Örneğin sert kaya kazı fiyatının yumuşak toprak kazısından fazla olması beklenmektedir. Teklifin reddedilmesi bir kalemin reddedilmesine bağlı olduğu için teklifin reddedilme riski en sakıncalı kalem fiyatıyla orantılıdır. Tepki riski ise fiyatı çok yüksek olan bir kalem için mimari projeyi bu kalemden kaçınacak şekilde yeniden revize etmeyi ya da fiyatı düşük olan bir kalem projede daha çok kullanılabilecek şekilde reviziyona gidilmesidir. Hatalı teklif riski ise yüklenicinin tecrübesine bağlıdır. Geçmişte yaptığı işlerden bir kalemin fiyatının doğru tahmin edilmesi önemli olmakta ve tecrübesiz bir yüklenicinin hatalı teklif riskiyle karşı karşıya kalabilme ihtimali oldukça yüksektir [9].

Dengesiz teklif sunmanın genel nedenleri şantiye kurulumu gibi giderler için kaynak yaratmak, paranın zaman değerini korumak, kesin hesapta iş kalemlerine verilen fiyatın kullanılması ve kârı maksimize etmektir. Sakıncaları ise rekabetin engellenmesi, önden ödeme yapılması ve geç ödemeye dengesizleştirilen işlerde fiyat farkı sebebiyle enflasyona bağlı olarak fazla ödeme yapılmasıdır [10]. Kamu ihalelerine katılan yüklenicilerle yapılan ankette proje aşamasında yanlış ya da eksik hesaplanan yaklaşık maliyetler ile kamu ihalelerine katılan yüklenicilerin kamu mevzuatı ve ihale sözleşme koşullarını iyi bilmemelerinin uygulama aşamasında yaşanan sorunların kaynağı olduğu görülmüştür [11]. Yasal iş artışı kapsamında meydana gelecek yeni iş kalemlerinin birim fiyatlarının tespitinde ise Yapım İşleri Genel Şartnamesinde gerekli değişiklikler yapılarak yeni iş kalemlerinin daha sağlıklı şekilde tespit edilmesi gerekmektedir [12]. Proje toplam maliyetini en çok etkileyen hususlar arasında; İhalelerin sözleşme bedellerinin proje kalite standartlarına uygunluğu, Maliyet tahmini için kullanılacak en güvenli metodlar ve alt yüklenici seçimine idarenin müdahil olmasının projenin süre, maliyet ve kalitesine etkisi ilk sıralarda yer almıştır [13].

Karaçar ve Demirdöven [14] ihale sürecinde inşaat maliyeti ve kâr marjını etkileyen riskleri belirlemek için yapılan işlerin parasal büyüklüğü ve istihdam edilen personel açısından Türkiye'den üç büyük firmanın yönetim kurulu üyesi, proje yöneticisi ve teklif müdürü ile görüşmüştür. İnşaat maliyeti açısından risklerin önem derecesi sırasıyla; politik risk, finansal risk, inşaat riski ve çevresel risk olarak belirlenmiştir.

Bazı büyük projelerde yönetim firmalarını zorlayacak değişiklikler olmakta ve Türkiye'deki firmalar yetersiz kaldığı için işin kalitesi azalmaktadır [15]. Polat ve Türkoğlu [16] dengesiz teklifin tespitine yönelik geliştirilen yöntemleri incelemiştir. Söz konusu yöntemler genel anlamda yetkili mühendisin iş kapsamındaki tahmin edilen birim fiyatlar ile teklif edilen birim fiyatların matematiksel olarak kıyaslanmasına dayanmaktadır. Türkiye'de kamu ihalelerinde dengesiz teklifin tespit edilmesi, tespit yöntemleri ve önlemleri ise ilgili kesin bir yönetmelik ve prosedür bulunmamaktadır. Özellikle Anahtar Teslimi Götürü Bedel işlerde iş artışının hangi koşullarda verilebileceği irdelenerek iş artışı yapılmalıdır. Bir imalat; ihale dokümanını oluşturan Uygulama Projesi, Mahal Listesi, Yapılacak İşler Listesi ve Teknik Şartname gibi belgelerden herhangi birisinde yer almıyorsa ilave iş kapsamında değerlendirilmesini Akçay ve Manısalı önermektedir [17].

Dengesiz teklifin etikliği konusunda iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Yüklenicilerin dengesiz teklif vermesinin altında doğrudan ve dolaylı maliyetler arasındaki farklar sebep olmaktadır. Malzeme tedarik şekilleri ve çalıştırdıkları personel sayıları ile ödedikleri ücretlerden kaynaklı farklar sebebiyle dengesiz teklif verilebilmektedir. Bunu engelleyici hususta yüklenicinin iç işlerine karışmak etik olarak karşılanmamaktadır. Diğer bakış açısında ise dengesiz teklif vermek sömürme ve etik dışı olarak tanımlanmaktadır [18].

Dengesiz teklif sunulması yaygın olarak görülen ve kamu ihalelerinde teklif verme rekabetinin adilliğini yok edip proje maliyetini artıran bir durumdur. Dengesiz teklif kavramı “dengeli” ve “dengesiz” arasında bir sınıra sahip olmaması sebebiyle iş sahipleri açısından tespiti zor ve karmaşık bir durumdur. Bu açıdan bakıldığında dengesiz teklifin önlenmesi için yeni bir yöntem geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüklenicilerin birbirinden farklı fiyat vermelerinin sebebi olarak farklı inşaat teknikleri, malzeme satın alma fiyatlarının farklılıkları gösterilebilir. Deneyimli mühendisin tahminini bir fiyat değerlendirme kriteri olarak seçip teklif sahiplerinin birim fiyatları mühendisin tahmini fiyatı ile karşılaştırılmıştır [19]. Ülkemizde deneyimli mühendis yerine Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından sunulan birim fiyat analizleri sektör tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda açıklanan maliyet değerleri gerçek maliyetlerin altında kalmaktadır. Ayrıca deprem bölgelerindeki yapım işlerinde çok ciddi artış olduğu için merkezi yönetim tarafından önerilecek işçilik ve malzeme maliyetlerinin deprem bölgelerindeki geçerliliği zayıf olacaktır.

Hyari ve Alamayreh, [20] işverenlerin gözünden yapılan çalışmaların ziyade yüklenicilerin gözünden dengesiz teklifin kullanılma amacının ve hangi yol ve sıklıkla kullanıldığını açıklamaya çalışmıştır. Dengesiz teklifin kullanıldığını ancak bunun sebebinin herkes tarafından kullanılması sonucu ihalede rekabetin sağlanması açısından kullanılmak zorunda olduğu, ayrıca caydırıcı önlemler olarak önlenmesinin herkesin faydasına olacağı değerlendirilmiştir. Polat vd. [21] dengesiz teklifin tespitine yönelik 5 farklı model geliştirmiştir. Oluşturulan modellerin temel ilkeleri maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir.

- Birinci modelde; her bir faaliyetin toplam fiyatının her bir teklif sahibi tarafından teklif edilen fiyat içindeki oranı, mal sahibi tarafından tahmin edilen fiyatla karşılaştırılır.
- İkinci modelde, her bir teklif sahibi tarafından teklif edilen her bir faaliyetin birim fiyatını teklif sahibi tarafından tahmin edilenlerle karşılaştırılır.
- Üçüncü modelde, her bir teklif sahibi tarafından teklif edilen her bir faaliyetin birim fiyatını n sayıda teklif sahibi tarafından teklif edilen birim fiyatların ortalaması ile karşılaştırılır.
- Dördüncü modelde, teklif sahibi tarafından teklif edilen fiyatın tahmini inşaat maliyeti ile karşılaştırılır.
- Beşinci modelde, teklif sahipleri tarafından teklif edilen ve iş sahibi tarafından tahmin edilen inşaat aşamasında miktarları artabilecek faaliyetlerin toplam fiyatları karşılaştırılır.

Jiang vd. Amerika’da inşa edilen 163 altyapı projesinin ihale ve uzlaşma verilerini istatistiksel olarak incelemiş ve yaklaşık maliyeti hesaplayan mühendislerin %98 oranında metrajlarda hata yaptığını bu nedenle artan riskler dolayısı ile yükleniciler zararlarını karşılamak amacıyla dengesiz teklif verme eğiliminde olduğu sonucunu elde etmiştir. Ayrıca yüklenicilerin %48’i kârlarını %5 oranında artırmak için dengesiz teklif verme eğiliminde olduğunu belirlemiştir. Yüklenicilerin kâr oranlarını doğrudan sözleşme bedeline yansıtılmaları durumunda işveren tarafından reddedilme riski yüksek olacağı için dengesiz teklif hazırlamaya yöneldiklerini belirlemiştir [22]. Polat vd. tarafından geliştirilen dengesiz teklifin belirlenmesine yönelik modelde proje türüne göre farklı ağırlıkların kullanılabilirdiği sekiz farklı derecelendirme sistemi sunulmuştur. Puanlama sistemine göre ağırlıklar atandıktan sonra, teklif sahiplerinin puanları hesaplanarak en düşük puana sahip teklifin en fazla en yüksek puanlı teklifin ise en az dengesiz teklif özelliği içerdiği sonucuna varılmaktadır [23]. Li vd. dengesiz teklifin belirlenebilmesi için çok faktörlü bulanık mantık kapsamlı yaklaşım önermiştir. Önerilen sistemde önce değerlendirme faktör kümesi ve derecelendirme seviyesi kümesi oluşturulur ve ardından her bir değerlendirme faktörünün ağırlık faktörü ve üyelik vektörü belirlenerek bulanık değerlendirme matrisi hesaplanır. Son olarak, bulanık değerlendirme matrisinin bulanık aritmetiğine ve faktörlerin ağırlık vektörüne dayalı olarak teklifin dengesiz olup olmadığı belirlenir [24]. Li vd. geçmiş projelerden veri tabanı oluşturularak dengesiz teklif tespit etmeyi amaçlamıştır [25]. Su vd. dengesiz teklifin tespiti için Çok Kriterli Karar Verme yaklaşımı olan VIKOR yöntemini kullanarak iş kalemleri için sunulan teklifleri değerlendirmiştir. Uzman mühendisin tahmini fiyatı değerlendirme kıyaslaması için kullanılarak mühendisin tahmini fiyatı ile her bir teklif birim fiyatı arasındaki göreceli uzaklıklar hesaplanarak karar matrisi oluşturulmaktadır [26].

Wang [27] anahtar teslim götürü bedel türünde sözleşme imzalanması ile yüklenicinin sunduğu teklif tutarlarının her bir maliyet kalemine dağıtılmasının makul olup olmadığının belirlenmesi için bir prosedür önermiştir. Prosedür 4 adımda toplanabilir. İlk adım hazırlık adımdır. Bu adımda mal sahibi ve tekliflerden alınan veriler tek bir elektronik tablo dosyasına işlenir. Değerlendirme adımı en düşük teklif sahibi tarafından sunulan teklif fiyatının makul olup olmadığı incelenir. Açıklama adımı teklif edilen fiyatın şüpheli olduğu düşünülüyorsa teklif sahibine tahminini desteklemek için açıklama yapma fırsatı verilir. Düzeltme adımı açıklama iş sahibi tarafından reddedilirse makul olmayan birim makul bir değere düşürülür.

Yıkıcı fiyatlandırma finansal açıdan güçlü bir isteklinin rakiplerini elemek ve bir sonraki ihalede rakiplerini korkutmak için kasıtlı olarak zararı kabul ettiği teklif tipidir. Yüklenicinin ihaleyi düşük bir fiyatla kazanması ve ardından sözleşmenin ifası sırasında fazladan ödeme almaya çalışmasıdır. İdare açısından başka bir yükleniciye yönelmesi halinde işlem maliyetleri ortaya çıkacağından yüklenici pazarlık gücü elde eder. Diğer bir yöntem

yüklenicinin düşük teklif vererek kaliteden kaçıp maliyetleri düşürme yoluna gitmesidir. Son olarak düşük teklifi bilgisizlik veya tecrübesizliğinden kaynaklı olarak vermiş olmasıdır [28].

Teklif birim fiyatlı sözleşmelerde bazı işverenler tarafından kesin metraj değerleri kullanılsa da genellikle miktarlar yaklaşık olarak verilir. Metrajı tam doğru olmayan iş kalemlerindeki ‘hataları’ tespit eden bir yüklenici, akıllıca fiyat manipülasyonu veya dengesizliği yaparak haksız kâr elde edebilir. Yüklenici önce mevcut verilen ve kendi tahmini olan miktarları karşılaştırıp hata olduğunu tespit ederse tekliflerini iki kısma göre ayarlar. Birinci kısım toplam teklif fiyatını değiştiremez çünkü rekabet olarak elverişli durumda kalmalıdır. İkincisi ise daha pahalı olması gereken fiyatları düşüremez örneğin kaya kazısı toprak kazısından daha pahalı olamaz. Yüklenici miktar hatası durumunu yanlış değerlendirirse bu durumdan zarar edebilir [29].

Kamu sözleşmelerinde dengesiz teklif avans ödenmesine sebep olduğu için sakıncalıdır ayrıca, rekabetçi ihale kavramına zarar verir. Yüklenici tarafından miktar hatası tespit edilerek şişirilmiş herhangi bir kalemden işin devamı sırasında iş artışı meydana gelebilir. İşin yapılmasından vazgeçilirse yüklenici zarara uğrayabilir ve konu adli mercilere taşınabilir. Belirtilen durumların önüne geçmek için işverenin dengesiz bir teklif veya programla karşı karşıya kalmayacağını doğrulamak için teklifler değerlendirilmeli ve varsa dengesizlik giderilmelidir [30].

Dengesiz teklifler analiz edilirken öncelikle; tahmini birim fiyatlardan önemli ölçüde farklılaşan kalemler gözden geçirilir, sözleşme için önemli olan kalemlerin miktarları kontrol edilir ve doğrulanır. Hatalı olduğu bilinen miktarlar düzeltilir ve bu miktarlar teklif edilen rakamlarla çarpılarak her teklif sahibinin brüt teklifi hesaplanır. En düşük teklifin hesaplanan brüt toplamının ikincinin brüt toplamından daha yüksek olması halinde en düşük teklif dengesiz kabul edilir. Böyle bir durumda ihale ikinci teklife verilebilir ya da iptal edilebilir [31].

Akin vd. bilgi entropisi ağırlık yöntemi ve VIKOR yöntemini kullanarak dengesiz teklifin tespitine çalışmışlardır. Sunulan tekliflerdeki değerler normalleştirilerek ağırlık matrisi ve ardından bilgi entropisi oluşturulur. Her kriter için temel bilginin sapması hesaplanır ve her teklif değeri için VIKOR indeksi elde edilir ve teklifler hesaplanan indeks değerine göre sıralanır. Çalışmanın sonucunda işverenin bir uzman mühendis tahminini veya tekliflerin aritmetik ortalaması yerine geometrik ortalamasının alınmasını önermektedir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgu deprem bölgesinde oluşan şartların oluşturduğu piyasa koşullarının ortaya koyduğu belirsizlik ve fiyatlandırma zorluğunun sonuçlarıyla uyusmaktadır [32]. Akin vd. dengesiz teklifin tespit edilebilmesi için Monte Carlo simülasyonu sonuçlarını uzman görüşü ile karşılaştırıp teklifler için yeniden dengeleme oranını belirlemiştir. Yapılan vaka çalışmasında önerilen modelin, yeniden dengelenmiş birim fiyatlar kullanıldığında en düşük teklifi verenin revize sonrasında yine en düşük teklif sahibi olarak kalması nedeniyle adil rekabet ortamını koruyarak fiyatların revize edildiğini göstermektedir [33]. Akin vd. teklifleri reddetmek yerine yeniden dengeleyerek dengesiz teklifleri önlemeyi amaçlayan dengesiz teklif önleme modeli sunmuştur. Teklif değerlerini ayarlamak için Monte Carlo Simülasyonu ile belirlenen ve denge oranı olarak adlandırılan parametre kullanılır. Bu parametre toplam teklif değerini değiştirmeden teklif verilen kalemlerin birim fiyatlarını değiştirmektedir [34].

Literatür taramasında dengesiz teklifin tespitine yönelik önlemler arasında tekliflerin ortalamasının alınması veya iş kaleminin maliyeti ile kıyaslanması gibi önlemler önerilmiştir. Deprem sonrası inşaat işlerinde ve yapı malzemelerindeki arz-talep dengesi bozulduğu için Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) tarafından hazırlanan birim fiyat listesinin veya ticaret odasının verilerini kullanabilmek mümkün değildir. İlgili birim fiyatlar yüklenicileri teklif vermektен caydıracak kadar güncel fiyatların altında kalmıştır. Ayrıca uzman görüşüne dayalı birim fiyat hesaplamaları inşaat maliyetlerinin sürekli dalgalandığı, il dışından işçi ve malzeme tedarikinin yaygın olduğu koşullarda hatalı sonuçlar verebilecektir. Bunun sonucunda aynı kâr oranı ile iş yapmayı hedefleyen yükleniciler herhangi bir iş kalemi için çok farklı fiyat verebilmektedirler. Bu nedenle bu çalışmada dengesiz teklifin tespiti yerine, metraj hatasına dayalı hazırlanan dengesiz teklifle çok yüksek kâr elde edilmesini engelleyecek sözleşme koşullarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Yüklenicinin iş artışı ile aşırı kâr elde etmesini engelleyerek gereksiz iş artışlarının önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

### 3. Yöntem

Güçlendirme inşaatlarının genel anlamda bakım onarım inşaatları ile aynı özellikleri taşıdığı kabul edilebilmekte ve uygulama projeleri için öncesinde hazırlansa dahi uygulama safhasında revizyon görebileceği değerlendirilmektedir. Güçlendirme esnasında ilk projede yer almayan ve yapım safhasında belirlenen sorunların ivedi çözülmesi birim fiyatlı sözleşme ile daha kolaydır. Belirtilen nedenden dolayı birim fiyatlı sözleşme, güçlendirme inşaatları için anahtar teslimi götürü bedel sözleşmelere göre daha uygun olabilecektir. Ayrıca güçlendirme inşaatı betonarme imalatların yanında ince işleri de içerdiğinden özellikle belirtilen ince işlerin miktarı ilk projeye göre artabileceği için teklif birim fiyatlı sözleşme daha uygulanabilir olmaktadır.

İşverenin sözleşme türleri hakkındaki bilgi düzeyi zayıf olacağı için anahtar teslim götürü bedel sözleşmelerde olabilecek kapsam değişikliği sonrası iş artış miktarının belirlenmesinde işçilik ve malzeme rayıçları hakkında yeterli bilgi sahibi olmadıkları ve sözleşme imzalandığı için yüklenicinin rekabet ortamı



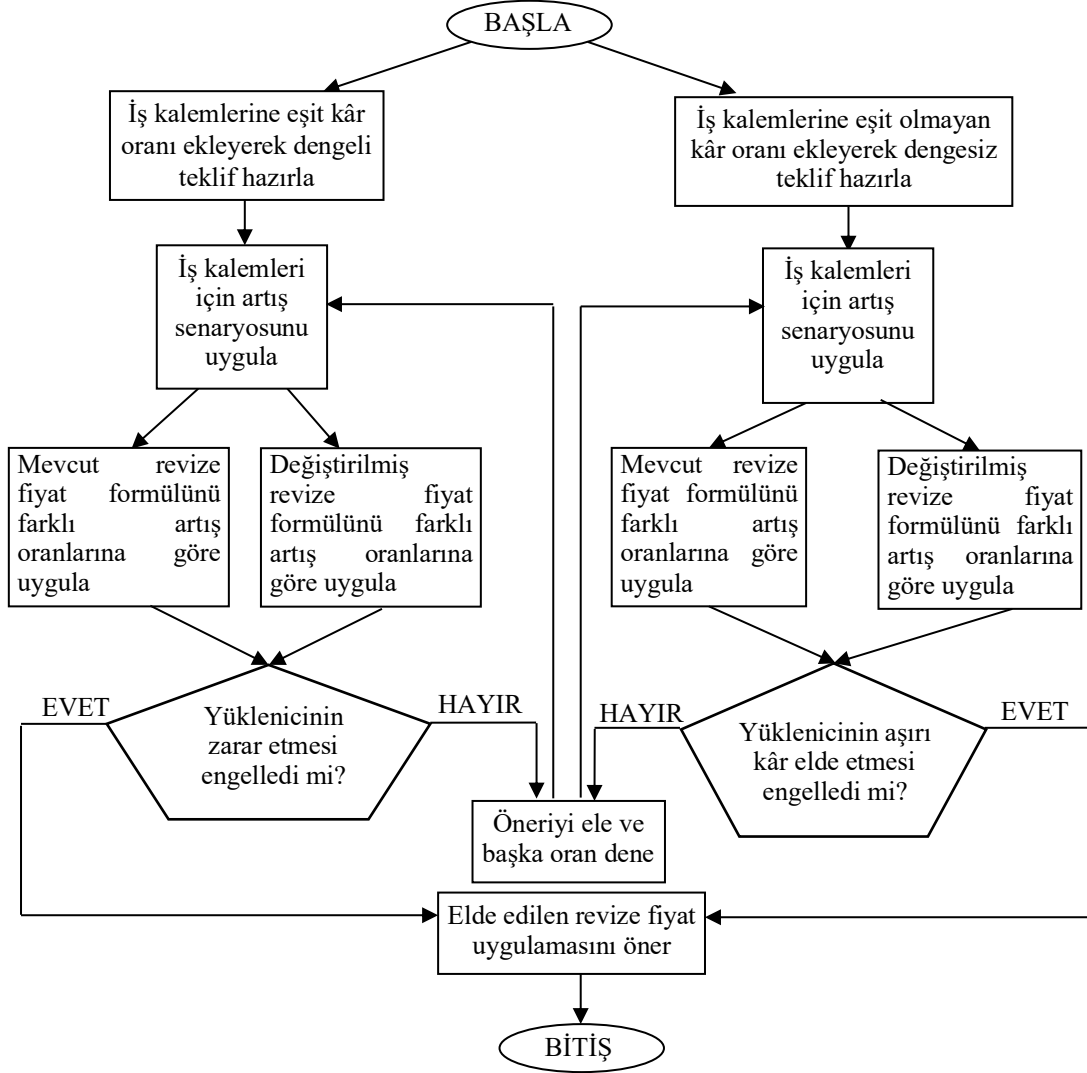
olmadan fiyat sunacağı için mağduriyet yaşayabilecekleri öngörülmektedir. Anahtar teslimi götürü bedel sözleşmelerde uygulama projesinde yer alan miktarlardan daha az imalat yapıldığında apartman sakinlerinin bunu kontrol edebilecek teknik bilgi düzeyi yeterli olmadığında yüklenici buradan haksız kazanç elde edebilecektir. Ayrıca birim fiyat sözleşmelerde uygulamada gerçekleştirilen imalatlar üzerinden ödemeler yapılacağı için haksız kazancın önüne geçilecektir.

İşverenin birim fiyatların hangisinin aşırı yüksek ya da hangisinin aşırı düşük olduğunu tek tek inceleyip belirlemek için yeterli teknik bilgiye sahip olmadığı ve bu nedenle birim fiyatların kontrol edilerek sözleşme imzalanacak isteklinin belirlenmesinin uygulanabilir olmadığı, toplam tutara dolayısıyla daire başına düşecek ödeme miktarına göre anlaşma sağlanacağı değerlendirilmektedir. İnşaat sırasında olabilecek iş artışları nedeniyle sözleşme bedelinin artacağı öngörülmektedir. Güçlendirme inşaatının kısa sürede tamamlanacağı ve teklif edilen birim fiyatlara enflasyon farkının ödenmeyeceği kabul edilmiştir. İnşaat işi boyunca her ay yapılan iş kadar hak ediş düzenleneceği varsayılmıştır.

Yüklenici teklif vermeden önce hasar rölövesinde yer almayan ve/veya işin uygulama sırasında gündeme gelecek bir konuyu önceden tespit ederek iş artışı olabilecek iş kalemlerinde daha yüksek kâr elde edecek şekilde dengesiz teklif sunabilmektedir. Yüklenicinin tasarımda fark edilemeyen, tasarım revizyonuna sebebiyet verebilecek hasarlı taşıyıcı elemanları teklif öncesi fark etmesi veya bina sakinlerinin endişe düzeyini kendi çıkarına kullanılabileceğini fark etmesiyle gerçekte gerekli olmayan iş artışlarına gidilebilmektedir. Söz konusu iş artışları yüklenici ile güçlendirme inşaatı sözleşmesi imzalandıktan sonra gerçekleşmektedir. İşverenler genel olarak sözleşme fesih haklarından tam olarak haberdar değildir. Buna ek olarak hâlihazırda sözleşme yapılarak işe başlayan ve hak ediş hakkı bulunan yüklenicinin sözleşmesini feshettiklerinde sözleşme yönetimi konusundaki bilgi ve tecrübe eksikliği nedeniyle maddi zarara uğrama ihtimalleri yüksektir. Ayrıca doğal afet sonrası orta hasarlı tanımlanan yapıların 1 yıl içerisinde güçlendirme projelerinin hazırlanması ve güçlendirme inşaatlarının tamamlanması mevcut yönetmelikler ve kararnameler dolayısıyla gerekmektedir. Aksi durumda yapı ağır hasarlı kabul edilmekte ve yapıya yıkım kararı alınmaktadır. Deprem performans analizi tamamlanmış, güçlendirme uygulama projeleri hazırlanmış ve inşaat ruhsatı alınmış bir yapının yerine başka yüklenicinin tercih edilmesi yoluna gidilemesi önemli düzeyde gecikmeye yol açabilecek, ayrıca yüksek enflasyon nedeniyle fiyatların artma riski de işverenin karar sürecini kısaltarak inşaat sürecini en kısa sürede başlatmaya yönelmektedir.

Kamu İhale Kanunu'nda yer alan usul ve esaslar, kamu idareleri ile yükleniciler arasında yıllardan beri yürütülmüş inşaat işleri neticesinde kazanılan deneyimlerle oluşmuş hükümlerdir. Ayrıca söz konusu hükümler işveren ve yüklenici arasında bir denge oluşturup her iki tarafında hakkını korumaya yöneliktir. Bu çalışmada özel mülkiyete ait yapılar üzerinde yürütülecek güçlendirme inşaatlarının kamu ihale kanununa tabi olmamasına rağmen belirtilen deneyimden faydalanarak tecrübesiz işverenin ne ölçüde korunabileceği tarafımızca denenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur.

İşin devamı sırasında meydana gelebilecek iş artışı ve eksiliş durumlarında yüklenici tarafından verilecek birim fiyatlar kullanılacaktır. Kamu ihale kanununda birim fiyat usulü ile gerçekleştirilen sözleşmelerde iş artışı miktarı hiçbir durumda sözleşme bedelinin %20'sini aşmamaktadır. Fakat hasar tespitinde belirlenemeyen hasar ve imalat kusurlarının giderilmesinin %20'den fazla iş artışına yol açabileceği durumlar yapı güvenliğini olumsuz etkileyebilecektir. Bu nedenle belirtilen sınır yerine Kültür Varlıkları Uygulama İşleri Genel Şartnamesinde yer alan %50 düzeyine kadar iş artışına izin veren oranın uygulanmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Belirtilen oran sözleşme bedeli için bir tavan fiyat uygulayarak işin bitiminde öngörülemeyecek düzeyde iş artışlarının oluşmasını engelleyecektir. Bu durum işveren açısından önemli bir avantaj olmakla birlikte yüklenicilerin belirli iş kalemlerine yüksek fiyat verip ilgili iş kalemlerinin miktarını inşaat sırasında artıracak proje revizelerine giderek dengesiz teklif koşullarını oluşturup işin makul kârının çok üzerinde kârları elde etmelerini tek başına engelleyemeyecektir.



Şekil 1. Dengesiz teklif için en uygun revize fiyat uygulamasını belirleme algoritması.

Dengesiz teklifle haksız kâr elde edilmesini önlemek için işin devamı sırasında iş artışı meydana gelmesi halinde Kamu İhale Kanunu ve eklerinde tarif iş artışı gerçekleşen iş kalemlerinin birim fiyatlarını revize eden formülden yararlanılacaktır. İhale mevzuatında yer alan tip sözleşmenin 28. Maddesinde ve Kamu İhale Genel Tebliğinin 52. Maddesinde revize birim fiyat, “Sözleşme eki birim fiyat teklif cetvelinde yer alan herhangi bir iş kaleminin miktarında, işin devamı sırasında %20’yi aşan artışın meydana gelmesi ve bu artışın aynı zamanda sözleşme bedelinin yüzde 1’ini geçmesi halinde, artışın sözleşme bedeli içindeki payı nispetinde ilgili iş kalemine ait birim fiyat aşağıda gösterildiği şekilde revize edilir ve bu iş kaleminin yüzde yirmi artışı aşan kısmına revize birim fiyat üzerinden ödeme yapılır.” Hükmü bulunmaktadır. Belirtilen koşulların gerçekleşmesi halinde Eşitlik 1’de gösterildiği gibi revize birim fiyat hesaplanır.

$$R = F \times \left[ 1 - \frac{(A \times F)}{S} \right] \quad (1)$$

Eşitlik 1’de  $S$ , Sözleşme bedeli (TL);  $F$ , İş kaleminin sözleşme birim fiyatı (TL/birim);  $A$ , İş kaleminde meydana gelen artış miktarı (birim);  $R$ , Revize birim fiyatı (TL/birim) ifade etmektedir. İlgili yönetmelik maddesinde tarif edilen iki koşulun da gerçekleşmesi halinde söz konusu işin birim fiyatı artış miktarı ile orantılı biçimde düşürülerek yüklenicinin haksız kazanç elde etmesinin önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

Revize birim fiyatın uygulanması iş artışının %20'sini aştığı kısımdan sonra uygulanmaktadır. Belirtilen oran birim fiyat revize edilene kadar çok yüksek miktarda kârın elde edilmesine neden olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada kanun maddesinde tarif edilen duruma ek olarak revize birim fiyatın %20 artıştan daha düşük iş artışı oranları için de uygulanma durumları da incelenmiştir. Ayrıca, sözleşme bedeline kıyasla fazla büyüklükte olmayan işlerde revize miktarı az olacağı için revize edilmiş birim fiyatla da yüksek kâr elde edilebileceği için revize değer etkisiz kalabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için revize fiyatın daha hızlı azalacağı formüller de denenmiştir. Belirtilen revizelerin makul kâr elde etmek isteyen, dengeli teklif sunan yüklenicileri mağdur etmemesine dikkat edilmiştir. Eşitlik 2'de sunulan modifiye revize birim fiyat formülü de denenmiştir.

$$R = F \times \left[ 1 - \left[ \frac{(A \times F)}{S} \right]^{1+AO} \right] \quad (2)$$

Eşitlik 2'de AO ilgili iş kaleminde işin tamamı dikkate alındığında görülen artış oranıdır. Eşitlik 2 ile elde edilen revize birim fiyatlar iş artışının sırası ile %20, %15, %10, %5 ve %0 eşiğini aşmasının ardından uygulanması durumlarında oluşacak yüklenici kârları adil teklif ve dengesiz teklif durumları için hesaplanmıştır.

#### 4. Vaka Analizi

Vaka çalışmasında kullanılan ve Malatya ilinde bulunan yapı 6 Şubat 2023 depremleri sonucu orta hasarlı olarak tanımlanmıştır. Oturma ruhsatı depremden yaklaşık 1 sene önce alınan yapı 1 bodrum ve zemin + 16 katlıdır. Binanın toplam kapalı alanı bodrum ve ortak alanlar dâhil 13,600 m<sup>2</sup> olup yeniden yapım yaklaşık maliyeti 3 Temmuz 2023 tarihi itibarı ile 272 milyon TL olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de ayrıntıları ile sunulan 19.573.275,66 TL bedelindeki güçlendirme maliyeti yeniden yapım maliyetinin %7,2'si tutarında olduğu için binanın güçlendirilmesi ekonomik açıdan da uygundur. Güçlendirme maliyeti yapıda 60 hak sahibi olduğu için her hak sahibine yaklaşık 350.000 TL maliyet getirmektedir. Her hak sahibinin devlet hibe desteği ve düşük faizli kredi teşviklerinin verilebilme şartlarını taşıdığı varsayıldığı durumda yeniden yapım için her hak sahibinin yaklaşık 3 milyon TL ek bedel ödemesi gerekecektir. Bina hak sahiplerinin %80'inden fazlasının onayı sağlanarak ilgili yasa ve yönetmelikler çerçevesinde yapının güçlendirilmesine karar verilmiştir. Bu karara ilişkin proje firması tarafından deprem performans analizi yapılmış ve ardından yapının güçlendirme projesi hazırlanmıştır. Uygulama projesinin hazırlanmasının ardından davet usulü ile güçlendirme inşaatı yapma yetkisi olan firmalardan fiyat teklifleri alınarak genel katımlı apartman toplantısında teklifler değerlendirilmiştir. Her bir iş kalemine verilen birim fiyatları ile iş kalemi toplam miktarları çarpılarak ortaya çıkan toplam tutarı en düşük olan teklif sahibiyle sözleşme imzalanarak inşaat başlanmaktadır.

Dengesiz teklif sunmayı amaçlayan yükleniciler güçlendirme işi için teklif vereceği binayı incelerken hasar rölövelerine işlenmemiş hasarlı kolon, perde, kiriş ve döşemeleri tespit etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca deprem esnasında hasar görmemiş fakat betonun segregasyona uğradığı, düzgün yerleştirilemeyip sıkıştırılmadığı yatay ve düşey taşıyıcıları tespit ederek ilgili binada iş artışı potansiyelini belirlemektedirler. İnşaat sürecinde proje kapsamında olmayan söz konusu yapısal elemanların güçlendirilmesi hususunda deprem dolayısı ile endişe ve kaygı düzeyi çok yüksek olan bina sakinlerini ikna edeceğine güvenerek dengesiz teklif hazırlama konusunda istekli davranabilmektedir. Bu maksatla ihaleye teklif verirken kolon ve perdelerde yapılacak olan kalıp, donatı, enjeksiyon ve beton imalatlarının ihale dokümanındaki miktardan fazla olacağını öngörerek bu kalemlere ait birim fiyatları yükseltip toplam teklif bedelinin değiştirmemesi için iş artışı olmayacak kalemlerin birim fiyatlarını düşürebilmektedirler. İşin devamı sırasında yüksek birim kâr sundukları iş kalemlerinde iş artışına gidecek şekilde proje revizesini bina sakinlerini deprem hakkında endişelendirerek kabul ettirerek kârını artırmayı hedefleyebilmektedir. Belirtilen koşullar altında dengesiz teklif sonucu yüklenicinin haksız kâr elde etmesini önlemeye yönelik önerilen tedbirlerin olası başarısı gerçek bir güçlendirme projesinin metrajı üzerinden hazırlanan sanal bir dengesiz teklif üzerinde incelenmiştir.

İlgili belediye ve yapı denetim firması tarafından onaylanan güçlendirme projesinin metraj cetveli oluşturularak ÇŞİDB Birim Fiyatlarıyla hazırlanan yaklaşık maliyet dokümanı Tablo 1'de sunulmuştur. Bakanlık iş tarifleri ve maliyetleri temel alınarak ilgili iş kalemlerinin inşaat yaklaşık maliyeti belirlenip maliyete belirli kâr yüzdeleri eklenecek dengesiz ve dengeli teklifler oluşturulmuştur. Gerçek inşaat maliyetlerinin Tablo 1'de sunulan değerler üzerinden gerçekleştiği, dengeli ve dengesiz tekliflerin söz konusu maliyet değerlerini temel alarak hazırlandığı varsayılmıştır. İş tarifleri bakanlığın yapım tariflerine atfedilerek Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Güçlendirme projesinin iş kalemleri ile metraj, birim fiyat ve teklif değerleri.

Sıra Nu.	Poz Nu.	İmalatın Çeşidi	Birim	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Toplam Tutar	Toplam Tutar (€)*
1	KGM/18.185	Patlayıcı madde kullanmadan demirli ve demirsiz beton inşaatın yıkılması	m <sup>3</sup>	530,92	268,95	142.790,93	5.028,59
2	48.690.2019	Epoxy Enjeksiyon ile Çatlak Tamiri	m	225	6.308,03	1.419.306,75	49.982,98
3	77.160.1003	Projesine göre betonda 30 cm kadar (30 cm dahil) yatay, ... işçilik, araç ve gereç giderleri ile malzemenin nakli, müteahhit karı ve genel giderler dahil 1 adedinin fiyatıdır.	ad	27.864,00	389,06	10.840.767,84	381.773,64
4	15.150.1005	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 25/30 basınç dayanım sınıfında, gri renkte, normal hazır beton dökülmesi (beton nakli dahil)	m <sup>3</sup>	467,99	1.716,14	803.136,36	28.283,63
5	15.180.1003	Plywood ile düz yüzeyli betonarme kalıbı yapılması	m <sup>2</sup>	3.539,47	401,88	1.422.442,20	50.093,40
6	15.185.1014	Ön yapımlı bileşenlerden oluşan tam güvenli, tavanlar için iş iskelesi yapılması. (0,00-21,50 m arası)	m <sup>3</sup>	4.679,90	71,53	334.753,25	11.788,83
7	15.160.1003	Ø 8- Ø 12 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması	ton	42,05	26.318,95	1.106.711,85	38.974,49
8	15.160.1004	Ø 14- Ø 28 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması	ton	65,8	25.828,95	1.699.544,91	59.851,98
9	15.540.1269	Yeni sıva yüzeylere macun ve astar uygulanarak iki kat sentetik boya yapılması (iç cephe)	m <sup>2</sup>	3.539,47	178,09	630.344,21	22.198,50
10	15.275.1102	200/250 kg kireç/çimento karışımı kaba ve ince harçla sıva yapılması (iç cephe sıvası)	m <sup>2</sup>	3.539,47	253,14	895.981,44	31.553,31
11	19.100.1101	Mobil Beton Pompasının Bir Saatlik Ücreti (420 HP)	sa	93,6	2.964,70	277.495,92	9.772,43
TOPLAM						19.573.275,66	689.301,79

\* 3 Temmuz 2023 tarihinde T.C. Merkez Bankası Euro satış kuru (1 € = 28,3958 TL.)

Tablo 1’de verilen değerler inşaat işinin maliyetini belirtmek için sunulmuştur. Makul düzeyde kâr elde ederek ve tüm iş kalemlerinde yaklaşık olarak aynı kâr oranını elde etmeyi amaçlayan yüklenici tarafından hazırlanan hipotetik teklif Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Dengeli teklif sunan hipotetik yüklenici tarafından hazırlanan fiyat cetveli.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	283,74	150.643,24	5.305,12
2	48.690.2019	m	225,00	6654,97	1.497.368,25	52.732,03
3	77.160.1003	adet	27.864,00	410,46	11.437.057,44	402.772,86
4	15.150.1005	m <sup>3</sup>	467,99	1810,53	847.309,93	29.839,27
5	15.180.1003	m <sup>2</sup>	3.539,47	423,98	1.500.664,49	52.848,11
6	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4.679,90	75,46	353.145,25	12.436,53
7	15.160.1003	ton	42,05	27766,49	1.167.580,90	41.118,08
8	15.160.1004	ton	65,80	27249,54	1.793.019,73	63.143,84
9	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3.539,47	187,88	664.995,62	23.418,80
10	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3.539,47	267,06	945.250,86	33.288,40
11	19.100.1101	saat	93,60	3127,76	292.758,34	10.309,92
				TOPLAM	20.649.794,06	727.212,97

Tablo 2’de sunulan teklif dengeli teklif olarak tanımlanan teklifte yüklenicinin kârı 1.076.518,41 TL olarak hesaplanmıştır. Miktar hatasına bağlı dengesiz teklif sunmayı hedefleyen yüklenici muhtemel iş artışı olacak kalemlerde birim fiyatı artmış, iş değişikliği ile miktarı düşecek iş kalemlerinde ise birim fiyatı düşürerek en düşük fiyatı sunmayı başarmıştır. Dengesiz teklif veren yüklenicinin teklifi Tablo 3’te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Yüksek kâr elde etmeyi hedefleyen yüklenici tarafından sunulan dengesiz teklif.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.18	m <sup>3</sup>	530,92	230,00	122.111,60	4.300,34
2	48.690.2019	m	225,00	3700,00	832.500,00	29.317,72
3	77.160.1003	adet	27.864,00	432,75	12.058.146,00	424.645,41
4	15.150.1005	m <sup>3</sup>	467,99	1992,5	932.470,08	32.838,31
5	15.180.1003	m <sup>2</sup>	3.539,47	416,00	1.472.419,52	51.853,43
6	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4.679,90	55,00	257.394,50	9.064,53
7	15.160.1003	ton	42,05	32500,00	1.366.625,00	48.127,72
8	15.160.1004	ton	65,80	31900,00	2.099.020,00	73.920,09
9	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3.539,47	145,00	513.223,15	18.073,91
10	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3.539,47	210,00	743.288,70	26.176,01
11	19.100.1101	saat	93,60	2600,00	243.360,00	8.570,28
				TOPLAM	20.640.558,55	726.887,73

Yüklenici hazırladığı dengesiz teklifte mevcut tekliflere göre daha düşük bir teklif hazırlamış gibi görünse de muhtemel iş artışı durumunda kârını maksimize edecektir. İnşaatın başlangıcında yüklenicinin net kârının 1.067.282,89 TL olması beklenmektedir. Belirtilen kâr miktarı dengeli teklifin altında kalmaktadır.

Üçüncü senaryoda dengesiz teklif sunan yüklenicinin hazırladığı teklif formuyla sözleşmenin imzalandığı, yer teslimi yapılmasını müteakip sözleşmede yer almayan ancak hasar almış veya imalat kusurları bulunan taşıyıcı elemanların da güçlendirilmesine yönelik iş artışının gerçekleştiği durum ele alınmıştır. Dengesiz teklif sunan yüklenici binadaki mevcut kusurlu imalatların sonuçlarını ve hasar rölövesinde yer almayan, kendi tespit ettiği hasarların etkilerini içeren, bazı elemanların epoksi ile çatlak tamiri yerine düşey taşıyıcı elemanların mantolama tekniğiyle güçlendirilmesi gerektiğini abartılı gerekçelerle açıklayan bir rapor hazırlayıp apartman sakinlerine sunmuştur. Sunulan rapor doğrultusunda iş artışı talep ettiği ve apartman sakinlerinin endişe düzeyinin de yüksek olması nedeniyle iş artışı kabul ettiği varsayılmıştır. Tasarlanan yeni projeye göre bazı kalemlerde azalış bazı kalemlerin miktarlarında ise iş artışı meydana gelmiştir. Revize edilen projede;

48.690.2019 numaralı pozun miktarı 30 metre, 77.160.1003 numaralı pozun miktarı 37.896 adet, 15.150.1005 numaralı pozun miktarı 609 m<sup>3</sup> 15.180.1003 numaralı pozun miktarı 4.284 m<sup>2</sup>, 15.160.1003 numaralı pozun miktarı 57,20 ton 15.160.1004 numaralı pozun miktarı 89,50 ton olmuştur. Altı iş kaleminde miktarların değişmesinin ardından işin güncel maliyeti Tablo 4'te sunulmuştur.

**Tablo 4.** Güçlendirme projesi iş kalemlerinin iş artışı sonrası güncel metraj, birim fiyat ve teklif değerleri

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	268,95	142.790,93	5.028,59
2	48.690.2019	m	30	6.308,03	189.240,90	6.664,40
3	77.160.1003	ad	37896	389,06	14.743.817,76	519.225,30
4	15.150.1005	m <sup>3</sup>	609	1.716,14	1.045.129,26	36.805,77
5	15.180.1003	m <sup>2</sup>	4248	401,88	1.707.186,24	60.121,08
6	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4.679,87	71,53	334.751,10	11.788,75
7	15.160.1003	ton	57,2	26.318,95	1.505.443,94	53.016,43
8	15.160.1004	ton	89,5	25.828,95	2.311.691,03	81.409,61
9	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3.539,47	178,09	630.344,21	22.198,50
10	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3.539,47	253,14	895.981,44	31.553,31
11	19.100.1101	sa	93,6	2.964,70	277.495,92	9.772,43
				TOPLAM	23.783.872,73	837.584,18

İş artışı sonucu oluşan miktarlara göre revize birim fiyat uygulaması yapılmayan dengesiz teklif sonucu işverenin ödemesi gereken tutarın hesabı Tablo 5'te sunulmuştur.

**Tablo 5.** Revize birim fiyat uygulanmadığında dengesiz fiyat teklif cetvelinin güncel durumu.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar(€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	230,00	122.111,60	4.300,34
2	48.690.2019	m	30	3.700,00	111.000,00	3.909,03
3	77.160.1003	adet	37896	432,75	16.399.494,00	577.532,38
4	15.150.1005	m <sup>3</sup>	609	1.992,50	1.213.432,50	42.732,82
5	15.180.1003	m <sup>2</sup>	4248	416,00	1.767.168,00	62.233,43
6	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4679,87	55,00	257.392,85	9.064,47
7	15.160.1003	ton	57,2	32.500,00	1.859.000,00	65.467,43
8	15.160.1004	ton	89,5	31.900,00	2.855.050,00	100.544,80
9	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3539,47	145,00	513.223,15	18.073,91
10	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3539,47	210,00	743.288,70	26.176,01
11	19.100.1101	saat	93,6	2.600,00	243.360,00	8.570,28
				TOPLAM	26.084.520,80	918.604,89

Birim fiyatların revize edilmemesi ve sözleşme bedeline üst sınır uygulanmaması halinde dengesiz teklif sunan yüklenici kârı iş artışı ile birlikte 2.300.648,07 TL'ye yükselecektir. Dengeli teklife göre iş artışı yapılan durum için hazırlanan fiyat cetveli Tablo 6'da sunulmuştur.

**Tablo 6.** Revize proje için dengeli teklif sunan yüklenici tarafından hazırlanan fiyat cetveli.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	283,74	150.643,24	5.305,12
2	48.690.2019	m	30,00	6654,97	199.649,10	7.030,94
3	77.160.1003	adet	37896	410,46	15.554.792,16	547.784,96
4	15.150.1005	m <sup>3</sup>	609,00	1810,53	1.102.612,77	38.830,14
5	15.180.1003	m <sup>2</sup>	4248,00	423,98	1.801.067,04	63.427,23
6	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4679,87	75,46	353.142,99	12.436,45
7	15.160.1003	ton	57,20	27766,49	1.588.243,23	55.932,33
8	15.160.1004	ton	89,50	27249,54	2.438.833,83	85.887,13
9	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3539,47	187,88	664.995,62	23.418,80
10	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3539,47	267,06	945.250,86	33.288,40
11	19.100.1101	saat	93,60	3127,76	292.758,34	10.309,92
				TOPLAM	25.091.989,18	883.651,43

Belirtilen duruma göre iş artışı ile birlikte dengeli teklif sunan yüklenici kârının 1.308.116,45 TL olması beklenmektedir. Bu açıdan bakıldığında yüksek kâr elde etmeyi hedefleyen yüklenici ile dengeli teklif sunan hipotetik yüklenicilerin kârları arasında 992.531,62 TL tutarında bir fark ortaya çıkmaktadır. Oluşan fark dengesiz teklif nedeniyle yüklenicinin elde edeceği yüksek kazançtır. Sözleşme bedelinin en fazla %50'ye kadar arttırılabilmesi koşulu oluşan aşırı artışın engellenmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle daha etkin bir tedbir olan revize fiyat uygulamasına gidilmesi gerekmektedir. Revize birim fiyat uygulanabilmesi için gerçekleşmesi gereken iki koşul kontrol edilmelidir. Birinci durumda iş kalemlerinin miktarlarının başlangıç durumuna göre %20'den fazla artış göstermesi koşulunun kontrolü yapılmalıdır. İkinci koşulda ise söz konusu iş artışlarının toplam sözleşme bedelinin %1'ini geçip geçmediğinin kontrolü Tablo 7'de sunulduğu gibi yapılır. Her iki koşulun gerçekleştiği iş kalemlerinin birim fiyatları revize edilir.

**Tablo 7.** Birim fiyatların revize edilmesini gerektiren koşulların kontrolü.

Poz No	Artış Oranı	Artış Yüzdesi	Koşul 1	Artış Bedeli	Artışın Sözleşme Bedeline Oranı (%)	Koşul 2
77.160.1003	37.896/27.864	36,00%	sağlanmıştır	10.032*432,75	%22,18	sağlanmıştır
15.150.1005	609/467,99	30,13%	sağlanmıştır	141,01*1992,50	%1,44	sağlanmıştır
15.180.1003	4248/3.539,47	20,02%	sağlanmıştır	708,53*416,00	%1,51	sağlanmıştır
15.160.1003	57,20/42,05	36,03%	sağlanmıştır	15,15*32500	%2,52	sağlanmıştır
15.160.1004	89,50/65,80	36,02%	sağlanmıştır	23,70*31900	%3,86	sağlanmıştır

Sözleşmede yer alan iş artışı durumunda revize birim fiyat kuralına göre yüklenicinin verdiği teklif fiyatları revize edilmiştir. Dengesiz teklif sunan yüklenicinin birim fiyatları Eşitlik 1 uygulanarak revize edilmiş ve elde edilen revize birim fiyatları aşağıda sunulmuştur;

$$77.160.1003 \text{ numaralı poz için, } R = 432,75 * \left[ 1 - \frac{(10.032,83 * 432,75)}{20.640.558,55} \right] = 341,73 \text{ TL/Ad}$$

$$15.150.1005 \text{ numaralı poz için, } R = 1.992,50 * \left[ 1 - \frac{(141,01 * 1.992,50)}{20.640.558,55} \right] = 1965,38 \text{ TL/m}^3$$

$$15.180.1003 \text{ numaralı poz için, } R = 416,00 * \left[ 1 - \frac{(708,53 * 416,00)}{20.640.558,55} \right] = 410,06 \text{ TL/m}^2$$

$$15.160.1003 \text{ numaralı poz için, } R = 32.000 * \left[ 1 - \frac{(15,15 * 32.000)}{20.640.558,55} \right] = 31724,72 \text{ TL/ton}$$

$$15.160.1004 \text{ numaralı poz için, } R = 31.900 * \left[ 1 - \frac{(23,70 * 31.900)}{20.640.558,55} \right] = 30.731,56 \text{ TL/ton}$$

Revize birim fiyat uygulaması yapılan ve revize fiyatların iş artışının %20'yi geçtikten sonra uygulandığı duruma göre hesaplanan fiyat cetveli Tablo 8'de sunulmuştur.

**Tablo 8.** Revize birim fiyat yapılmış duruma göre dengesiz teklifin fiyat cetveli.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	230,00	122.111,78	4.300,35
2	48.690.2019	m	30,00	3.700,00	111.000,00	3.909,03
3	77.160.1003	ad	33.437,00	432,75	14.469.861,75	509.577,53
4	77.160.1003	ad	4.459,00	341,73	1.523.770,89	49.288,12
5	15.150.1005	m <sup>3</sup>	561,59	1.992,50	1.118.964,09	39.405,97
6	15.150.1005	m <sup>3</sup>	47,41	1.965,38	93.182,49	3.268,04
7	15.180.1003	m <sup>2</sup>	4.247,36	416,00	1.766.903,42	62.224,11
8	15.180.1003	m <sup>2</sup>	0,64	410,06	260,80	9,16
9	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4.679,87	55,00	257.392,74	9.064,47
10	15.160.1003	ton	50,46	32.500,00	1.639.950,00	57.753,26
11	15.160.1003	ton	6,74	31.724,72	213.824,62	7.464,93
12	15.160.1004	ton	78,96	31.900,00	2.518.824,00	88.704,10
13	15.160.1004	ton	10,54	30.731,56	323.910,59	11.254,70
14	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3.539,47	145,00	513.223,44	18.073,92
15	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3.539,47	210,00	743.289,12	26.176,02
16	19.100.1101	sa	93,60	2.600,00	243.353,14	8.570,04
				TOPLAM	<b>25.659.822,88</b>	<b>899.043,75</b>

Revize fiyatlara göre güncellenen hak ediş ödemeleri sonucunda yüklenici kârının 1.875.950,15 TL olması beklenmektedir. Mevcut birim fiyat sözleşmelerinde uygulanan revize birim fiyat yaklaşımı ile dengesiz teklif veren yüklenicinin elde edeceği kâr 424.697,92 TL azaltılmıştır. Revize birim fiyat hesaplamaları dengeli teklif için de yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 9'da sunulmuştur.

Revize edilmiş fiyatlarla dengeli teklif sunan yüklenicinin 1.204.224,31 TL kâr etmesi beklenmektedir. Revize birim fiyat uygulaması işverene maliyet artışının sınırlandırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Fakat makul kâr oranı göz önüne alınarak hesaplanan kazancın yaklaşık bir milyon TL olduğu ve mevcut revize birim fiyat uygulamasında dengesiz teklif sunan yüklenicilerin aşırı iş artışına gidecek şekilde güçlendirme projelerini revize etmelerinin önüne geçecek düzeyde bir kâr eksiltmesi yapamadığı görülmektedir. Burada önemli olan dengeli teklif sunan yüklenicinin kârını aşırı düzeyde azaltmadan dengesiz teklif sunan yüklenicinin kârının aşırı artmasını önlemektedir. Bu nedenle revize birim fiyat uygulamasının %20 yerine %15, %10, %5 ve ilk artıştan itibaren yapılması durumunda kâr miktarının ne kadar değiştiğine yönelik durum Tablo 10'da sunulmuştur.

**Tablo 9.** Revize birim fiyat yapılmış duruma göre dengeli teklifin fiyat cetveli.

Sıra Nu.	Poz Nu.	Ölçü Birimi	Miktar	Birim Fiyat	Toplam Tutar (TL)	Toplam Tutar (€)
1	KGM/18.185	m <sup>3</sup>	530,92	283,74	150.643,47	5.305,13
2	48.690.2019	m	30,00	6.654,97	199.649,10	7.030,94
3	77.160.1003	ad.	33.437,00	410,46	13.724.551,02	483.330,32
4	77.160.1003	ad.	4.459,00	328,61	1.465.276,36	47.631,05
5	15.150.1005	m <sup>3</sup>	561,59	1.810,53	1.016.771,92	35.807,12
6	15.150.1005	m <sup>3</sup>	47,41	1.788,15	84.779,56	2.974,47
7	15.180.1003	m <sup>2</sup>	4.247,36	423,98	1.800.797,39	63.417,74
8	15.180.1003	m <sup>2</sup>	0,64	417,81	265,73	9,33
9	15.185.1014	m <sup>3</sup>	4.679,87	75,46	353.142,84	12.436,45
10	15.160.1003	ton	50,46	27.766,49	1.401.097,09	49.341,70
11	15.160.1003	ton	6,74	27.200,85	183.333,74	6.408,67
12	15.160.1004	ton	78,96	30.731,56	2.426.563,58	84.314,14
13	15.160.1004	ton	10,54	26.397,32	278.227,77	9.686,71
14	15.540.1269	m <sup>2</sup>	3.539,47	187,88	664.996,00	23.418,82
15	15.275.1102	m <sup>2</sup>	3.539,47	267,06	945.251,39	33.288,42
16	19.100.1101	sa	93,60	3.127,76	292.750,08	10.309,63
				TOPLAM	24.988.097,04	874.710,62

**Tablo 10.** Revize birim fiyat yüzdelerine göre kâr miktarları

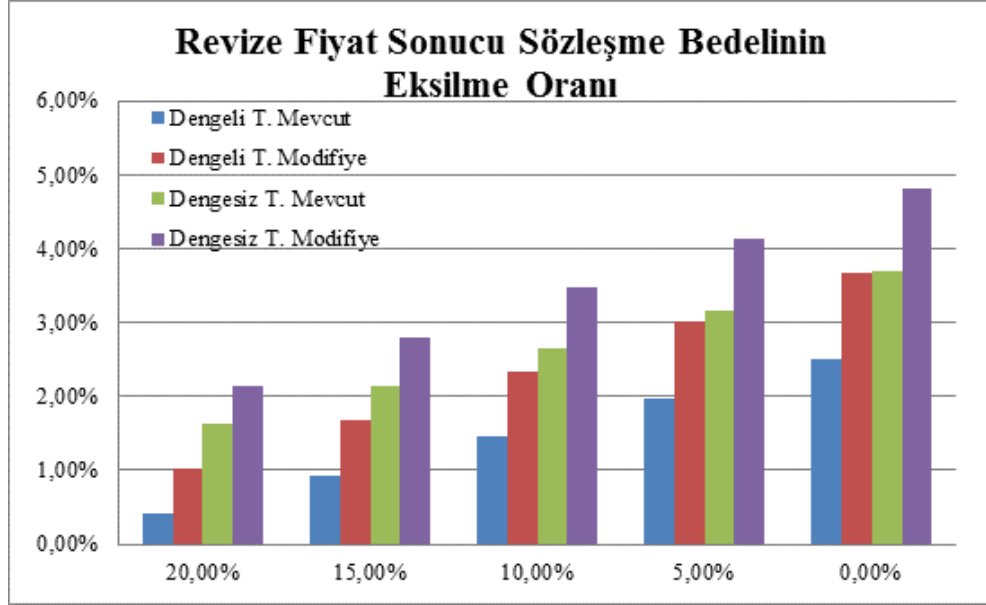
Çizelgeler	20%	15%	10%	5%	0%
Rev. Birim Fiyat Uygulandığı Durumda Dengesiz Teklif	25.659.822,88 TL (903.648,53 €)	25.525.870,86 TL (898.931,21 €)	25.391.827,82 TL (894.210,69 €)	25.257.875,80 TL (889.493,37 €)	25.123.923,78 TL (884.776,05 €)
Rev. Birim Fiyat Uygulandığı Durumda Dengeli Teklif	24.988.097,04 TL (879.992,71 €)	24.857.017,14 TL (875.376,54 €)	24.725.855,40 TL (870.757,49 €)	24.594.775,50 TL (866.141,31 €)	24.463.695,60 TL (861.525,14 €)
Revize Birim Fiyat Uygulanınca Dengesiz Teklifteki azalma	424.697,92 TL (14.956,36 €)	558.649,94 TL (19.673,68 €)	692.692,98 TL (24.394,21 €)	826.645,00 TL (29.111,52 €)	960.597,02 TL (33.828,84 €)
Revize Birim Fiyat Uygulanınca Dengeli Teklifteki azalma	103.892,14 TL (3.658,72 €)	234.972,04 TL (8.274,89 €)	366.133,78 TL (12.893,94 €)	497.213,68 TL (17.510,11 €)	628.293,58 TL (22.126,29 €)
Dengesiz Teklif Kâr Miktarı	1.875.950,15 TL (66.064,35 €)	1.741.998,13 TL (61.347,03 €)	1.607.955,09 TL (56.626,51 €)	1.474.003,07 TL (51.909,19 €)	1.340.051,05 TL (47.191,88 €)
Dengeli Teklif Kâr Miktarı	1.204.224,31 TL (42.408,54 €)	1.073.144,41 TL (37.792,36 €)	941.982,67 TL (33.173,31 €)	810.902,77 TL (28.557,14 €)	679.822,87 TL (23.940,97 €)

Revize birim fiyat formülünün Eşitlik 2’de önerilen hali ile kullanılması durumunda revize birim fiyat uygulamasının %20, %15, %10, %5 ve ilk artıştan itibaren yapılması durumunda sözleşme miktarının ne kadar değiştiğine yönelik durum Tablo 11’de sunulmuştur. Tablo 10 ve 11’de sunulan dengeli ve dengesiz teklifler için uygulanan mevcut revize birim fiyat formülünün farklı iş artış oranları için uygulanması ile elde edilen sözleşme bedelindeki eksiltme oranları Şekil 2’de sunulmuştur. Şekilde mavi çubuklar dengeli teklif için mevcut revize birim fiyat formülünün uygulanması, kırmızı çubuklar dengeli teklif için modifiye revize birim fiyat formülünün uygulanması, yeşil çubuklar dengesiz teklif için mevcut revize birim fiyat formülünün uygulanması ve mor çubuklar dengesiz teklif için modifiye revize birim fiyat formülünün uygulanması sonucu sözleşme bedelinde oluşan eksilme oranı sunulmuştur. Yatay eksen revize birim fiyat formülünün hangi iş artışı oranından sonra uygulandığını ifade etmektedir.



**Tablo 11.** Eşitlik 2’de yer alan Revize birim fiyat formülüne göre proje bedeli ve kâr miktarları.

Çizelgeler	20%	15%	10%	5%	0%
Rev.Birim Fiyat Uygulandığı Durumda Dengesiz Teklif	25.529.066,54 TL (899.043,75 €)	25.353.990,00 TL (892.878,17 €)	25.178.794,58 TL (886.708,41 €)	25.003.718,03 TL (880.542,83 €)	24.828.641,49 TL (874.377,25 €)
Rev.Birim Fiyat Uygulandığı Durumda Dengeli Teklif	24.838.107,78 TL (874.710,62 €)	24.671.369,07 TL (868.838,66 €)	24.504.523,23 TL (862.962,94 €)	24.337.784,53 TL (857.091,00 €)	24.171.045,82 TL (851.219,05 €)
Revize Birim Fiyat Uygulanınca Dengesiz Teklifteki azalma	555.454,26 TL (19.561,14 €)	730.530,80 TL (25.726,72 €)	905.726,22 TL (31.896,49 €)	1.080.802,77 TL (38.062,06€)	1.255.879,31 TL (44.227,64 €)
Revize Birim Fiyat Uygulanınca Dengeli Teklifteki azalma	253.881,40 TL (8.940,81 €)	420.620,11 TL (14.812,76 €)	587.465,95 TL (20.688,48 €)	754.204,65 TL (26.560,43 €)	920.943,36 TL (32.432,38 €)
Dengesiz Teklif Kâr Miktarı	1.745.193,81 TL (61.459,58 €)	1.570.117,27 TL (55.294,00 €)	1.394.921,85 TL (49.124,23 €)	1.219.845,30 TL (42.958,65 €)	1.044.768,76 TL (36.793,07 €)
Dengeli Teklif Kâr Miktarı	1.054.235,05 TL (37.126,44 €)	887.496,34 TL (31.254,49 €)	720.650,50 TL (25.378,77 €)	553.911,80 TL (19.506,82 €)	387.173,09 TL (13.634,87 €)

**Şekil 2.** Revize fiyat uygulaması ile sözleşme bedelinde oluşan eksilme oranları.

Tablo 10 ve 11’de sunulan değerler incelendiğinde modifiye edilmiş revize birim fiyat formülünün %0 iş artışından sonra uygulanması halinde dengeli teklif sunan yüklenici kârı önemli ölçüde düşmüştür. Bu nedenle %0 iş artışında birim fiyatların revize edilmesi çok uygun olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte revize birim fiyat uygulamasının mevcut haliyle %20 iş artışından sonra gerçekleşmesi durumunda dengesiz teklif veren yüklenici için caydırıcı olamayacağı ve yüksek miktarda iş artışına yol açabileceği görülmüştür. Ayrıca bazı dengesiz pozların artış oranlarını %20 sınırında tutarak yüksek miktarda kazanç sağlayabilecektir. Bu nedenle revize birim fiyat uygulama eşliğinin %0 ile %20 arasında olmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. Her iki oranın ortası olan %10 artıştan sonra uygulanmasının işveren ve adil teklif sunan yüklenicinin hakları açısından makul olduğu görülmektedir. Ayrıca yüklenicinin çok yüksek miktarda kazanç elde etmesini engellemek için modifiye edilmiş revize birim fiyat formülünün uygulanmasının daha doğru olacağı değerlendirilmektedir.

## 5. Sonuçların Tartışılması

Bu çalışmada ihale ve sözleşme konusunda deneyimli yüklenicilerin belirtilen konularda deneyimsiz bina sahipleri tarafından yürütülecek güçlendirme inşaatları sırasında iş artışı beklentisine bağlı dengesiz teklif sunması sonucu işverenin uğrayabileceği mağduriyetleri gidermeye yönelik önlemler araştırılmıştır. Dengesiz teklif sunan bir yüklenici yüksek kâr edeceği iş kalemlerinin miktarını arttırdığında çok yüksek kâr elde edebileceği için iş artışına gidilmesi için sürekli olarak sözleşme eki olan güçlendirme projesinin yetersiz ve hatalı olduğunu iddia edecek ve deprem dolayısı ile endişeli olan bina sakinlerini proje revizyonuna ikna etmek için mesleki bilgi ve deneyimini kötüye kullanabilecektir.

Yüklenici girişimi ile miktarı artırılan iş kalemlerinin inşa edilmesi sonucu binanın yapısal güvenliğinde dikkate değer bir fayda olmayacak, ancak sözleşme bedeli ve yüklenici kârı oldukça yükselecektir. Sözleşme ve ihale konusunda yeterli düzeyde bilgisi olmayan bina sakinleri yaygın olarak internetten veya sosyal medya uygulamaları üzerinden temin ettikleri sözleşme metinleri veya yüklenicinin hazırladığı sözleşmelerle güçlendirme inşaatlarını yürütmektedir. Belirtilen sözleşmelerde iş artışlarına karşı herhangi bir tedbir bulunmadığı için işveren sıfatını taşıyan bina sakinleri önemli mağduriyetler yaşamaktadır.

Bu çalışmada belirtilen yüksek iş artışlarının önüne geçilmesi için birim fiyatların uygun bir şekilde revize edilerek yüklenici için iş artışının çok cazip hale gelmemesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte güçlendirme işlerinin doğası gereği fark edilemeyip hasar rölövesine işlenmemiş taşıyıcı eleman hasarlarının sıva kazımaları sonrası tespit edilme ihmali ve benzeri durumlar nedeniyle iş artışı olma olasılığı yüksektir. Ayrıca her yüklenicinin art niyetli biçimde dengesiz teklif vermeyeceği aşıkardır. Bu nedenle birim fiyatların aşırı hızlı azalacak şekilde revize edilmesi durumunda adil teklif veren yükleniciler mağdur olacak ve aşırı revize fiyat uygulamasının yaygınlaşması halinde yükleniciler güçlendirme işlerine teklif vermekte isteksiz davranacaklardır.

Belirtilen nedenlerden dolayı işveren ve yüklenici arasında riskleri eşit şekilde paylaşırarak, yükleniciyi iş artışından sakındırmayıp yapı güvenliği için gerekli olabilecek iş artışlarının tekniğine uygun biçimde inşa edilmesini sağlayacak sözleşme koşullarının geliştirilmesine çalışılmıştır. Mevcut yönetmeliklerde revize birim fiyat uygulaması iş artışının %20'lik payı geçtikten sonra gerçekleştiği için yüklenici oldukça yüksek kazanç elde edebileceği için sözleşme imzalandıktan sonra en az %20 iş artışı yakalamak için çok fazla istekli olacaktır. Bu nedenle revize birim fiyat uygulamasının iş artışının %20'yi bulmadan uygulanması gereklidir. Sunulan çizelgelerden görüleceği üzere revize birim fiyat uygulamasının iş artışı olur olmaz uygulanması halinde ise yüksek miktarda iş artışlarında dengeli teklif sunan yüklenicinin çok az kâr edeceği ve hatta zarar edebileceği görülmektedir. Bu durumda dengeli teklif sunan yüklenici zarar edeceğini görüp iş artışı olması gereken durumlarda bina güvenliğini riske edip hasar rölövesine işlenmemiş hasarları bildirmeyecek veya düşük maliyetli çözümlerle tekniğine uygun olmayacak şekilde onarma yoluna gidebilecektir. Bu nedenle revize birim fiyat formülünün iş artışının %10'u geçtikten sonra uygulanması önerilmektedir.

Mevcut revize birim fiyat formülü birim fiyatı oldukça yavaş biçimde düşürmektedir. Dengesiz teklifin sunulduğu iş kalemlerinde kâr oranının %25'leri bulabileceği değerlendirildiğinde mevcut revize birim fiyat formülü dengesiz teklif sunan yüklenicileri iş artışına gitme heveslerini azaltmak için oldukça yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle daha hızlı fiyat düşüşü sağlayan modifye birim fiyat formülünün uygulanması önerilmektedir. Tablo 11 incelendiğinde dengesiz teklif sunan yüklenicinin yanı sıra dengeli teklif sunan yüklenicinin kârının %10 iş artışından sonra revize birim fiyat uygulaması yapılması halinde oldukça azaldığı görülmektedir. Ancak belirtilen durum bazı iş kalemlerinde %30 mertebesinde iş artışlarının olmasından sonra gerçekleşmiştir. İşinde deneyimli bir yüklenicinin belirtilen oranlarda gerçekleşecek iş artışını teklif sunarken yapacağı ön keşif esnasında tespit etmesi beklenir. Bu nedenle sunulan modifye revize birim fiyat formülü yükleniciler için önemli bir risk taşımamakta, yüklenicilerin sözleşme öncesi proje eksikliklerini tespit edip işvereni bilgilendirmeye teşvik etmektedir.

Bu çalışma kapsamında inşaat işlerinde ve sözleşme koşulları üzerinde deneyimi yüksek olan yükleniciler karşısında ilgili alanlarda deneyimi yok denecek kadar az olan hak sahiplerinin uğrayabileceği mağduriyetlerin azaltılması için revize birim fiyatların uygulanması önerilmiştir. Buna ek olarak yapılan işlerin miktarı ve dolayısı ile metraj konusunda da anlaşmazlıkların gerçekleşmesi olasıdır. Bu durumda Yapı Bilgi Modeli (YBM) tabanlı yazılımlar kullanılarak yapılan işlerin ve kullanılan malzemenin tam miktarlarının hesaplanması mümkün olabilecektir [35 - 37]. Bu sayede metraj değerleri üzerinden anlaşmazlıkların ortaya çıkması engellenebilecektir.

## 6. Sonuç

Bu çalışmada deprem sonrası hasarlı binaların güçlendirme inşaatlarının gerçekleştirilmesi sırasında miktar hatasına bağlı dengesiz teklif sunularak aşırı iş artışına gidilmesi ve proje bedellerinin aşırı yükselmesini önleyecek tedbirlerin alınmasına yönelik sözleşme koşulları tartışılmıştır. Deprem sonrası aşırı miktarda artan inşaat işleri nedeniyle deprem bölgelerinde işçilik ve yapı malzemesi maliyetleri çok yükselmiş, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan birim fiyat değerlerinin karşılaştırma amacıyla kullanılabilmesi olanaksız hale gelmiştir. Ayrıca yüklenicilerin birçoğu il dışında işçi getirmekte ve bölgeden uzaktaki malzeme tedarikçileri ile çalışmaktadır. Bu nedenle aynı iş kalemi için çok farklı fiyatlar verilebilmektedir. Bu nedenle literatürde bulunan dengesiz teklifi tespit eden yaklaşımlar deprem sonrası oluşan kaotik durumda doğru sonuç vermekten uzak kalmaktadırlar.

Dengesiz teklifin deprem bölgelerinde tespitinin çok güç olması nedeniyle bu çalışmada dengesiz teklif sunmanın yükleniciler için cazip olmasının önünü kesen yaklaşımların getirilmesi üzerinde durulmuştur. Örnek vaka üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde revize birim fiyatın iş artışının %10'u geçtikten sonra uygulanmasının hem işveren hem de yüklenicinin haklarının korunması açısından daha uygun olacağı belirlenmiştir. Ayrıca mevcut revize birim fiyat formülünün birim fiyatı düşürme hızının yavaş olması nedeniyle dengesiz teklif sunan yüklenicilerin önemli miktarda iş artışı düzeyine ulaşana kadar iş artışına gidilmesi konusunda isteklerini azaltmakta yetersiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle birim fiyatı daha hızlı revize eden revize birim fiyat formülünün kullanılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir. Çalışma sonucu elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Mevcut revize birim fiyat formülü dengesiz teklif sunan yüklenicinin iş artışı ile aşırı kâr elde etmesini engelleyememektedir.
- Revize birim fiyatın daha düşük iş artışı oranlarında uygulanması gereklidir.
- Mevcut revize birim fiyat formülü birim fiyatı yeterli hızda düşürememektedir.
- Modifiye revize birim fiyat formülünün iş artışı %10'u geçtikten sonra uygulanması dengesiz teklif sunan yüklenicinin kârını uygun oranda azaltırken dengeli teklif sunan yüklenicinin makul kâr edebilmesine imkân vermektedir.
- Çalışma tek vaka analizi üzerinden yürütüldüğü için farklı sözleşme bedelleri ve farklı iş kalemlerindeki artışlarda daha farklı bulgular elde edilebilecektir.

Bu çalışma sonucu ortaya konulan sözleşme koşullarının güçlendirme ihaleleri sonrası imzalanacak sözleşmelere dahil edilmesi sonucu yüklenicilerin agresif biçimde iş artışına yol açacak girişimlerinin azaltılacağı ve depremde mağdur olan bina sakinlerinin gereksiz iş artışı olmadan binalarını güçlendirerek eski düzenlerine ekonomik biçimde kavuşabilmeleri sağlanacaktır. Bu sayede bölge ekonomisinin toparlanması ve canlanmasının hızlanması sağlanabilecektir.

### Yazar Katkı Beyanı

ST: Birim fiyat ve metraj değerlerinin belirlenmesi ve kaynak taramasının yapılması. ÖHB: Revize birim fiyat formülü ve uygulama yüzdelerinin revize edilmesi.

### Kaynaklar

- [1] Nikpour B, Senouci A, Eldin N. Detection tool for unbalanced bids. *Open J of Civil Eng*, 7(03), 409, 2017.
- [2] Stark RM. Unbalanced bidding models-theory, *J of the Constr Div*, 94(2), 197-209, 1968.
- [3] Ashley DB, Teicholz PM. Pre-estimate cash flow analysis, *J of the Constr Div*, (103.03),369-379, 1977.
- [4] Diekmann JE, Mayer Jr, RH, Stark RM. Coping with uncertainty in unit price contracting, *J of the Constr Div*, 108(3), 379-389, 1982.
- [5] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. The risks of unbalanced bidding, *Constr Manage and Econ*, 28(4), 333-344, 2010.
- [6] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. Proposed framework for applying cumulative prospect theory to an unbalanced bidding model, *J of Constr Eng and Manage* 137(12), 1052-1059, 2011.
- [7] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. Review of unbalanced bidding models in construction, *J of Constr Eng and Manage*, 133(8), 562-573, 2007.
- [8] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. A simplified unbalanced bidding model, *Constr Manage and Econ*, 26(12), 1283-1290, 2008.
- [9] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. The risks of unbalanced bidding, *Constr Manage and Econ*, 28(4), 333-344, 2010.
- [10] Yılmaz M, Bakış A, Derel ZA, Çiçek C. İnşaat ihalelerinde dengesiz teklif, 2015.
- [11] Gencer YMH, Yaklaşık Maliyet Hesaplama Esasları, Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar Ve Çözüm Önerileri, *Problems In Practice And A Solution Recommendation*. 2017.

- [12] Gencer H. Anahtar Teslimi Götürü Bedel Sözleşmelerde Yasal İş Artışı ve Yeni İş Kalemi Birim Fiyatının Düzenlenmesinde Ortaya Çıkan Sorunlar ile Yeni İş Kalemi Pursantaj Oranının Düzenlenmesine Yönelik Yaklaşımlar İnşaat Yönetimi Kongresi, Bildiriler Kitabı, 203–209, 2011.
- [13] Uğur LO, Yapı İşleri Mevzuatı ve Yapım İşleri Genel Şartnamesi üzerine yüklenici inşaat firmaları orijinli eleştirel bir bakış Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2(2), 374–393, 2014.
- [14] Karaçar P, Demirdöven JB. İhale Sürecinde İnşaat Maliyeti ve Kar Marjını Etkileyen Risklerin Durum Değerlendirmesi, 2014.
- [15] Temel B, Güranlı GE, Mağççek SB. İnşaat sektöründe oluşan iş değişiklik taleplerini azaltacak bir proje yönetim sistemi önerisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 662–673, 2021.
- [16] Polat G, Türkoğlu H. İnşaat Projelerinde Kullanılan Dengesiz Teklif Tespit Yöntemleri Üzerine Bir İnceleme, 2017.
- [17] Akçay C, Manısalı E, 4734 Sayılı Kamu İhale Kanunu ve 4735 Sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanununun, AB Uygulamaları Çerçevesinde Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar Açısından İncelenmesi, 4. İnşaat Yönetimi Kongresi, Bildiri Kitabı, 13-26 2007.
- [18] Cattell DW, Bowen PA, Kaka AP. Proposed framework for applying cumulative prospect theory to an unbalanced bidding model, J of Constr Eng and Manage 137(12), 1052–1059, 2011.
- [19] Su L, Wang T, Li H, Chao Y, Wang L. Multi-criteria decision making for identification of unbalanced bidding, J of Civil Eng and Manage, 26(1), 43–52, 2020.
- [20] Hyari KH, Alamyreh T. Unbalanced bidding in construction projects: A contractors' perspective, Int J of Constr Manage, 23(12), 2058–2066, 2023.
- [21] Polat G, Turkoglu H, Damci A. Detection of unbalanced bids: A case study. Creative Constr Conference 432–439, 2018.
- [22] Jiang Y, Bai Y, Han S, Lin T. Probability of failure in infrastructure project unbalanced bidding. In Proceedings of the 55<sup>th</sup> Annual Conference of the Associated Schools of Construction. Associated Schools of Constr, 2019.
- [23] Polat G, Turkoglu H, Damci A, Dogu Akin, F. Detecting unbalanced bids via an improved grading-based model. Organization, technology & Manage in Constr: an Int J, 12(1), 2072-2082., 2020.
- [24] Li H, Su L, Lelin LV, Xia Q. Detecting unbalanced bidding to achieve economic sustainability using fuzzy logic approach. Constr Innovation, 21(2), 164-181, 2021.
- [25] Li H, Su L, Zuo J, An X, Dong G, Wang L, Zhang C. The framework of data-driven and multi-criteria decision-making for detecting unbalanced bidding. Eng, Constr and Archit Manage, 30(2), 598-622, 2023.
- [26] Su L, Wang T, Li H, Chao Y, Wang L. Multi-criteria decision making for identification of unbalanced bidding. J of Civil Eng and Manage, 26(1), 43-52, 2020.
- [27] Wang WC. Electronic-based procedure for managing unbalanced bids, J of Constr Eng and Manage, 130(3), 455–460, 2004.
- [28] Nyström J, Mandell S. Skew to win, not to profit–unbalanced bidding among informed bidders. J of Public Procurement, 19(1), 46-54, 2019.
- [29] Yizhe T, Youjie LU. Unbalanced bidding on contracts with variation trends in client-provided quantities, Constr Manage and Economics, 10(1), 69–80, 1992.
- [30] Manzo FA. The impact of an unbalanced bid on the change order process, Constr for News, 7(1), 1–8, 1997.
- [31] Arditi D, Chotibhongs R. Detection and prevention of unbalanced bids, Constr Manage and Econ, 27(8), 721-732, 2009.
- [32] Akin FD, Damci A, Arditi D, Demirkesen S. An advanced decision-support system for ranking unbalanced bids, Constr Manage and Econ, 1-14, 2024.
- [33] Akin FD, Damci A, Yaşar S. Prevention of Unbalanced Bids: A Counter Strategy. Advances in Civil Eng (ACE2021), pp. 289 – 296, 2021.
- [34] Akin F, Damci A, Polat G, Turkoglu H. A risk-based approach to prevent unbalanced bids. In Proc, 6<sup>th</sup> Int Project and Constr Manage Conf (e-IPCMC2020). Istanbul, Turkey: Istanbul Technical Univ, 2020.
- [35] Ergen F, Bettemir ÖH. Development of ontological algorithms for exact QTO of reinforced concrete construction items. In Structures (Vol. 60, p. 105907). Elsevier, 2024, February.
- [36] Ergen F, Bettemir ÖH. Yüksek doğrulukta kaba inşaat kalemlerinin metrajını hesaplayan YBM tabanlı prototip yazılımın geliştirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(1), 86-105, 2023.
- [37] Ergen F, Bettemir ÖH. Development of BIM software with quantity take-off and visualization capabilities. J of Constr Eng, Manage & Innovation, 5(1), 1-14, 2022.



## Taşkın Tahmininde Farklı Havzaların Kullanılması; Artvin Taşkınlarının İncelenmesi Örneği

Ufuk YÜKSELER<sup>1\*</sup>, Ömerul Faruk DURSUN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>\*1</sup> ufukyuksele12@gmail.com, <sup>2</sup> faruk.dursun@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 16/02/2024;

Kabul/Accepted:24/09/2024)

**Öz:** Taşkınların duyarlılık ve risk sahasının tespitinde son dönemlerde kullanılan makine öğrenimi yöntemleri oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir. Literatürdeki çoğu çalışmada görüldüğü üzere taşkın yaşanan havzanın veri bulunan ve afet yaşandığı bilinen bir kısımdan yola çıkılarak taşkın tetikleyici parametrelerle havzanın tahmin edilmesini istenen veya veri eksikliği bulunan bir kısmı tahmin edilmektedir. Ancak bahse konu bu çalışmaların en büyük eksikliği hiçbir verisi bulunmayan havzaların tahmin olanağının olmamasıdır. İkinci husus ise makine öğrenim yöntemlerinin aynı havza içerisindeki tahminlerde aşırı öğrenme problemi oluşturmasıdır. Bu çalışmada veri bulunmayan havzaların tahmininde farklı havzaların kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla Artvin il sınırları içinde 2009, 2015, 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen 4 adet taşkın kullanılmıştır. Çalışmada makine öğrenimi yöntemlerinden Rastgele Orman metodu kullanılmıştır. Yöntemin seçiminde, literatürde oldukça yüksek doğruluk değerlerine ulaşan çalışmalar olması ve taşkın gibi karmaşık olaylarda olay örgüsünü iyi analiz etmesi etkili olmuştur. Bu çalışmada rastgele noktalardan seçilen 1490 noktasal veri ile (2009, 2015 ve 2020 afetlerinden alınan) eğitim yapılmış ve 560 test verisi (2021 afeti ) tahmin edilmiştir. Çalışmanın doğrulaması 5 adet doğrulama yöntemleri (AUC, ACC, F, P, R ve F-Score) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğitim ve test verilerindeki doğruluk değerleri %90 düzeyinde tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 2021 yılında yaşanan afetin Rastgele Orman metodu ile tahmini, gerçek afet sahasına oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bulgular, taşkın afetinin önceden tahmin edilmesinde, havza planlamaları amacıyla oluşturulan havzanın risk ve duyarlılık haritalarının oluşturulmasında veri eksikliği bulunması durumunda havzalar arası tahminlerin başarısını göstermektedir. Metotların gelişimi ve örneklem sayısının artırılması ile bu alanda iyi sonuçlar alınabileceği ve afetlerle mücadele konularında kullanılabilirliği görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Taşkın, rastgele orman metodu, makine öğrenimi, coğrafi bilgi sistemleri, Artvin ili.

### Using Different Basins in Flood Forecasting; Example of Artvin Floods

**Abstract:** Machine learning methods used recently in determining the sensitivity and risk areas of floods give quite compatible results. As seen in most studies in the literature, a part of the basin where floods occur is estimated with flood trigger parameters based on a part of the basin where data is available and known to have experienced a disaster, or a part where data is missing is estimated. However, the biggest deficiency of these studies in question is the lack of estimation possibilities for basins with no data. The second issue is that machine learning methods create an overlearning problem in estimations within the same basin. In this study, the use of different basins in estimating basins with no data was examined. For this purpose, 4 floods that occurred within the borders of Artvin province in 2009, 2015, 2020 and 2021 were used. The Random Forest method, one of the machine learning methods, was used in the study. The selection of the method was influenced by the fact that there are studies in the literature that have reached very high accuracy values and that it analyzes the event pattern well in complex events such as floods. In this study, training was performed with 1490-point data selected from random points (taken from 2009, 2015 and 2020 disasters) and 560 test data (2021 disaster) were estimated. Validation of the study was carried out using 5 validation methods (AUC, ACC, F, P, R and F-Score). Accuracy values in training and test data were determined at the level of 90%. When the results were examined, the prediction of the disaster experienced in 2021 with the Random Forest method gave results very close to the real disaster area. The findings show the success of inter-basin predictions in case of data deficiency in the prediction of flood disasters and the creation of risk and susceptibility maps of the basin created for basin planning purposes. It is seen that good results can be obtained in this area with the development of methods and increasing the number of samples and can be used in disaster management issues.

**Key words:** Flood, random forest method, machine learning, geographic information systems, Artvin province.

\* Sorumlu yazar: [ufukyuksele12@gmail.com](mailto:ufukyuksele12@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7233-0821, <sup>2</sup> 0000-0003-3923-5205

## 1. Giriş

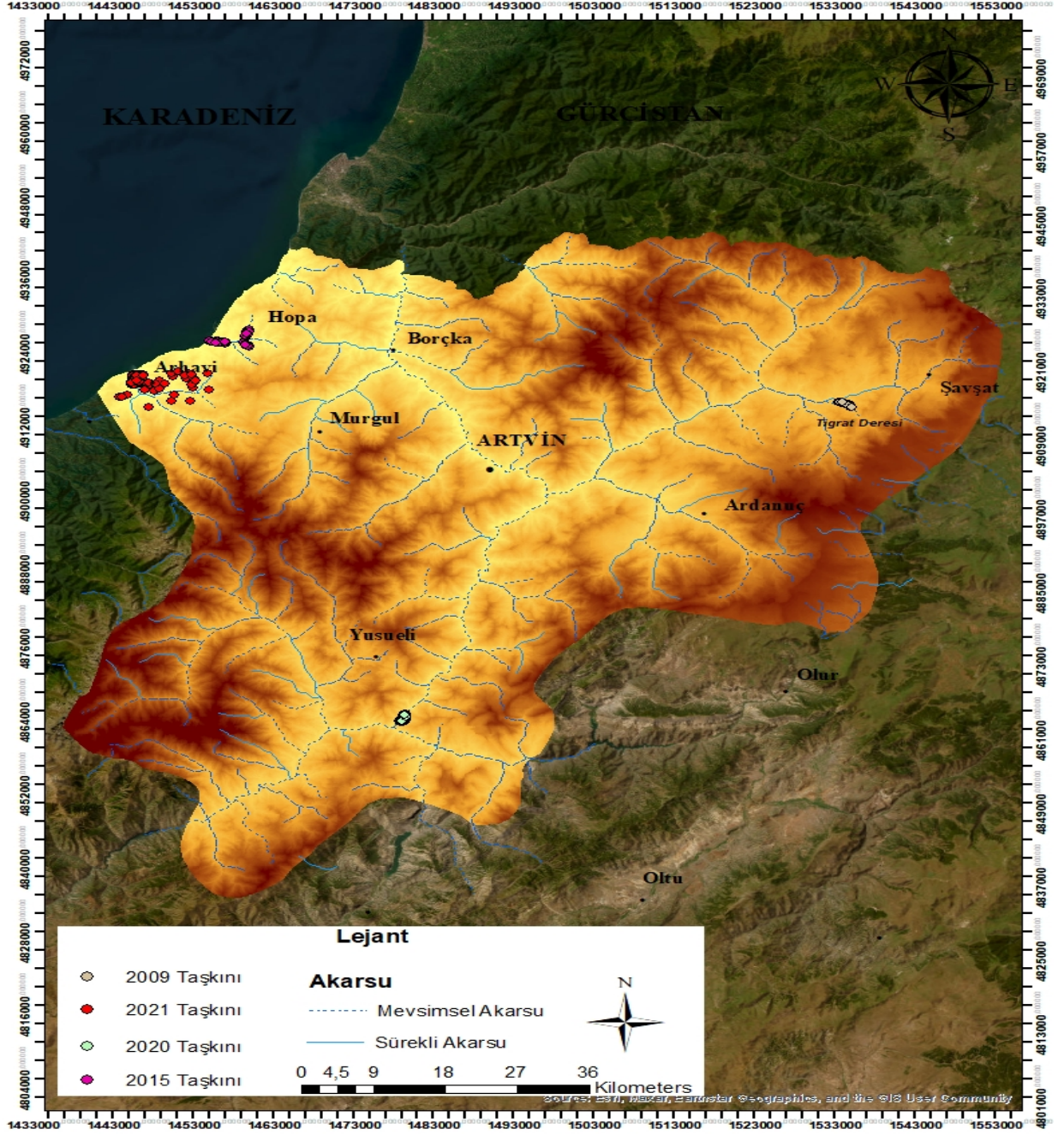
Taşkın afetleri yaşanma sıklığı nedeniyle literatürde en çok araştırılan konular arasında yer almaktadır. Son dönemlerde havzalardaki taşkın modellemesinde makine öğrenimi yöntemleri ise en sık kullanılan yöntemler arasındadır [1]. Taşkın afetinin meydana getirdiği bilançoğu azaltmak amacıyla son dönemlerde çalışma sayıları artmış olup, bu çalışmaların sonuçları gelecekteki afetlerden korunma konusunda ümit verici sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Makine öğrenimi modelleri; taşkın gibi meteorolojik verilerden oluşan afetler için, verilerin zaman serisi oluşu ve parametrelerin bağımlılığı nedeniyle uyumlu bir alan yaratmaktadır [2]. Taşkın olaylarının karmaşıklığı ve sonuca olan farklı etkileri bu çalışma alanının mevcut zorluğudur [3]. Taşkın afetlerinin tahmininde makine öğrenimi yöntemleri çalışmaları son dönemde oldukça artmıştır ve her giderek gerçek taşkın ve tahmin modelleri arasında daha uyumlu sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu konuda yapılan bazı çalışmalara bakıldığında; El-haddad vd., Mısır'daki Wadi Qena havzasındaki taşkınların risk sahalarının tespiti için makine öğrenimi yöntemlerini kullanmışlardır. Verilerin %70'i eğitim, %30'u test verisi olarak ve toplamda 342 noktasal veri kullanılmıştır [4]. Madhuri vd., Hindistandaki Greater Hyderabad bölgesindeki 2000, 2006 ve 2016 yıllarında yaşanan taşkın afetlerinden yola çıkarak makine öğrenimi yöntemleriyle havzanın risk haritaları çıkarmıştır [5]. Yükseler vd., yaptıkları çalışmada Türkiyede en fazla can ve mal kaybına neden olan Trabzon ilinin Solaklı havzasında yaşanan geçmiş çalışmalardan yola çıkarak model ağaç (M5PRGT, M5PRT) ve Lojistik regresyon yöntemleriyle risk haritasını çıkarmıştır. 1600 noktasal veriyle yapılan çalışmada, model ağaç yöntemlerinin taşkınların tespitinde diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [6]. Habibi vd., yaptıkları çalışmada, 12 hibrit modelle İrandaki taşkınların tahmin edilebilirliği konusunu incelemiştir. Yapılan bu modeller rastgele arama algoritması ile optimize edilmiştir. Kullanılan 12 modelden BGAM-Boruta modeli en iyi doğruluk değerlerine ulaşmıştır [7]. Saravanan vd., Hindistanın Idukki bölgesinde yaşanan sel olaylarını 5 farklı makine öğrenimi yöntemleriyle (Adaboost, Gradient Boosting, Extreme Gradient Boosting (XGB), CatBoost, Stokastik Gradient Boosting (SGB)) tahmin etmeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda En yüksek AUC değeri SGB ve GBC (%92) modellerinde en düşük AUC değeri ise %79 AUC ile CatBoost modelinde elde edilmiştir [8]. Lyu vd. (2023), Hong Kong ve Makao körfezlerinde kıyılarında sıklıkla meydana gelen sel olaylarını araştırmıştır. Çalışmada Rastgele Orman, gradyan artırma karar ağacı, aşırı gradyan artırma gibi ağaç tabanlı modeller kullanılmıştır. Çalışma sonucunda havzanın %16'sından fazlasının yüksek taşkın duyarlılığına sahip olduğu ve geçmiş tarihlerde yaşanan taşkınların %70'inin bu duyarlılık alanları yüksek noktalarda meydana geldiğini ifade edilmiştir [9].

Makine öğrenimi metotlarıyla taşkın risk ve duyarlılık noktalarının tespitinde literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak özelliği aynı havza içerisinde bazı verilerin eğitim verisi olarak kullanılıp, kalan verilerin test edilip ve doğruluk değerlerine ulaşmaktır. Ancak afet verisi bulunmayan havzaların tahmin edilmesi konusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Taşkın afeti çalışmalarında karşılaşılan en büyük problem veri eksikliğidir. Bu eksik veriler bazen taşkını tetikleyen parametreler olurken bazen afet sahasının yayılım haritasıdır. Bu çalışmada, afet sahasının belirlenemediği afetlerin yayılım haritasını tespit edebilmek amacıyla, yaşanan lokasyonun dışındaki lokasyonlardan alınan veriler neticesinde yayılım haritasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan yayılım haritalarındaki doğruluk değerinin artması aynı zamanda havzada taşkın konusunda riskli noktaların tespitinde de fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada, literatürde yoğun şekilde çalışılan taşkın çalışmalarının dışında aynı havza içinde risk tahminleme yöntemi değil farklı havzalar kullanılarak bir havzanın taşkın konusunda riskli noktaları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma alanı olarak, Türkiye sınırları içerisinde yer alan ve yağış miktarı ülkenin en yüksek değerlerine ulaşan Artvin ili seçilmiştir. 7493 km<sup>2</sup> yüzölçüme sahip bu ilde 2009, 2015, 2020 ve 2021 yıllarında 4 adet can ve mal kaybına neden olan taşkın afeti yaşanmıştır. Afet yaşanan havzalar ilin sınırları içinde farklı lokasyonlardadır. Bu çalışmada, literatürde bulunan çalışmaların dışında, 2009, 2015 ve 2020 yıllarında yaşanan afet verileri kullanılarak 2021 yılında gerçekleşen afetin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için taşkını tetikleyen 11 parametreyle çalışılmış, üç havzadan 1490 veriyle 2021 yılında yaşanan afetteki havzada 560 nokta tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan bu yöntem AUC, Doğruluk (ACC), kesinlik (P), geri çağırma (R) ve F-skor (F) doğrulama yöntemleriyle test edilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı olarak seçilen Artvin ili Türkiye'nin kuzeyinde yer alıp Karadeniz'e ve Gürcistan'a sınırı bulunmaktadır. Artvin ilinin en yüksek noktası 3927 metre ile Kaçkar dağlarının zirvesi, en düşük noktası ise Karadeniz'e sahil olan 0 metre yüksekliğe sahip deniz kıyılarıdır. Artvin ili dağlık ve yüksek engebeli yeryüzü şekillerine sahiptir. Çalışma kapsamında bu il sınırları içerisinde bulunan 2009, 2015, 2020 ve 2021 yıllarında yaşanan, can ve mal kayıplarına neden olan taşkınlar incelenmiştir (Şekil 1).

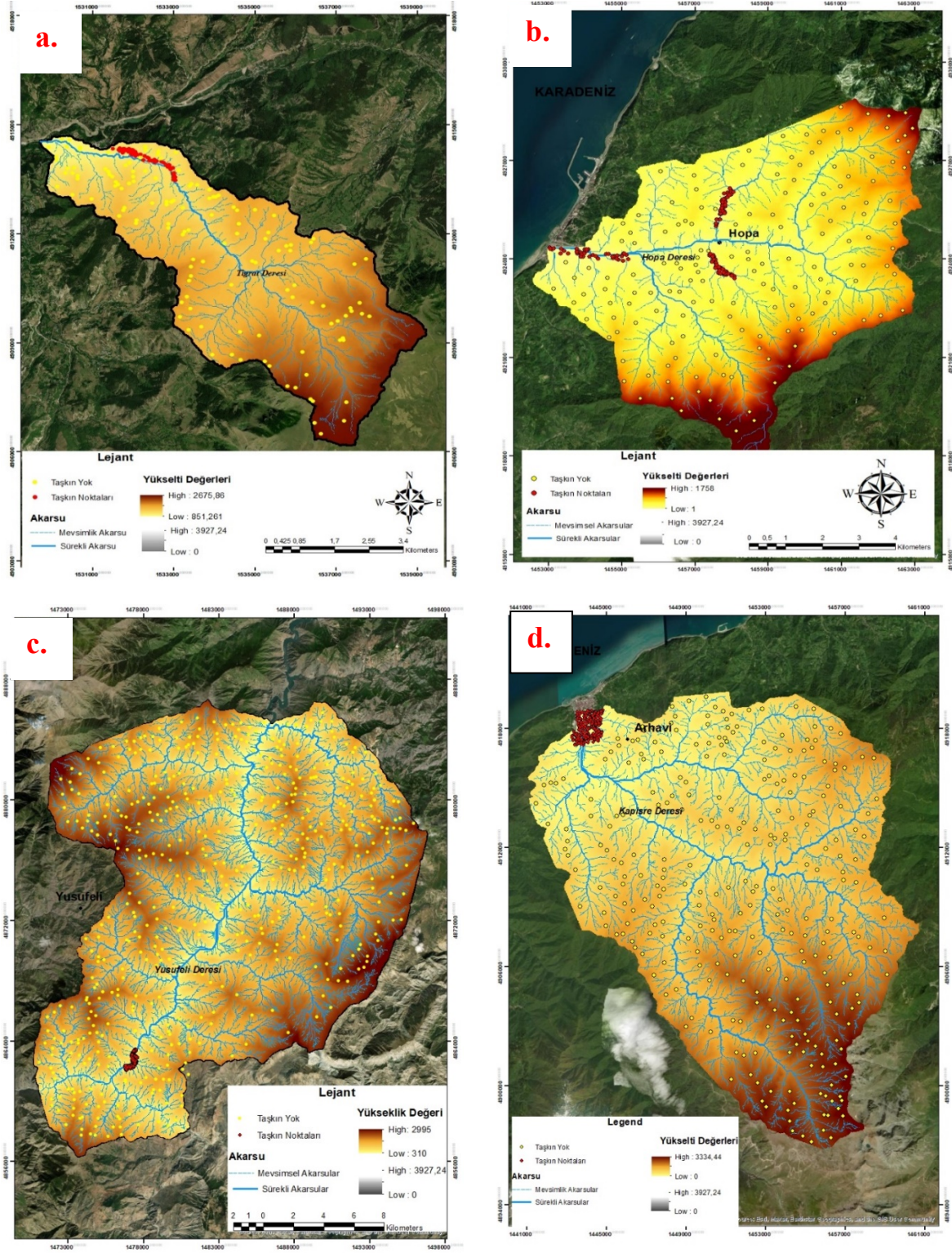


Şekil 1. Artvin İlinin taşkın ve Lokasyon Haritaları.

Artvin ili yüksek yağış değerleri ve eğimli arazisi nedeniyle heyelan ve taşkın olaylarının sık yaşandığı bir yerdir. 15.07.2009 tarihinde, Artvin ilinin Şavşat ilçesinde bulunan Tigrat deresinin taşması 5 vatandaşın can kaybına neden olmuştur. Bu afette 2 köprünün ayak kısımlarında oyulma meydana gelmiş ve köprüler yıkılmıştır (Şekil 2(a)). 24.08.2015 tarihinde, Hopa deresinin taşması sonucunda 11 vatandaş vefat etmiştir. Afet dolayısıyla 300'e yakın araç hasar görürken iş yerlerinde ciddi maddi hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 2(b)). 13.07.2020 tarihinde Yusufeli barajının şantiye alanında Yusufeli deresinin taşması sonucu 4 işçi vefat etmiştir (Şekil 2(c)). 25.07.2021 tarihinde Karpisre deresinin taşması sonucunda Arhavi ilçesinde taşkın meydana gelmiş, 3 kişi vefat etmiş ve maddi hasar meydana gelmiştir (Şekil 2(d)).



Taşkın Tahmininde Farklı Havzaların Kullanılması; Artvin Taşkınlarının İncelenmesi Örneği



Şekil 2. Yaşanan Afetlerin Lokasyon Haritası (a; 2009, b; 2015, c; 2020, d; 2021 afetleri).

Taşkın afeti Türkiye’de en fazla yaşanan meteorolojik afetlerdir. Bu afetlerin bilançoları afet sahasının durumuna göre değişmektedir. Taşkın riski olan alanları yerleşime açmak, akarsu yataklarına yapılan müdahaleler

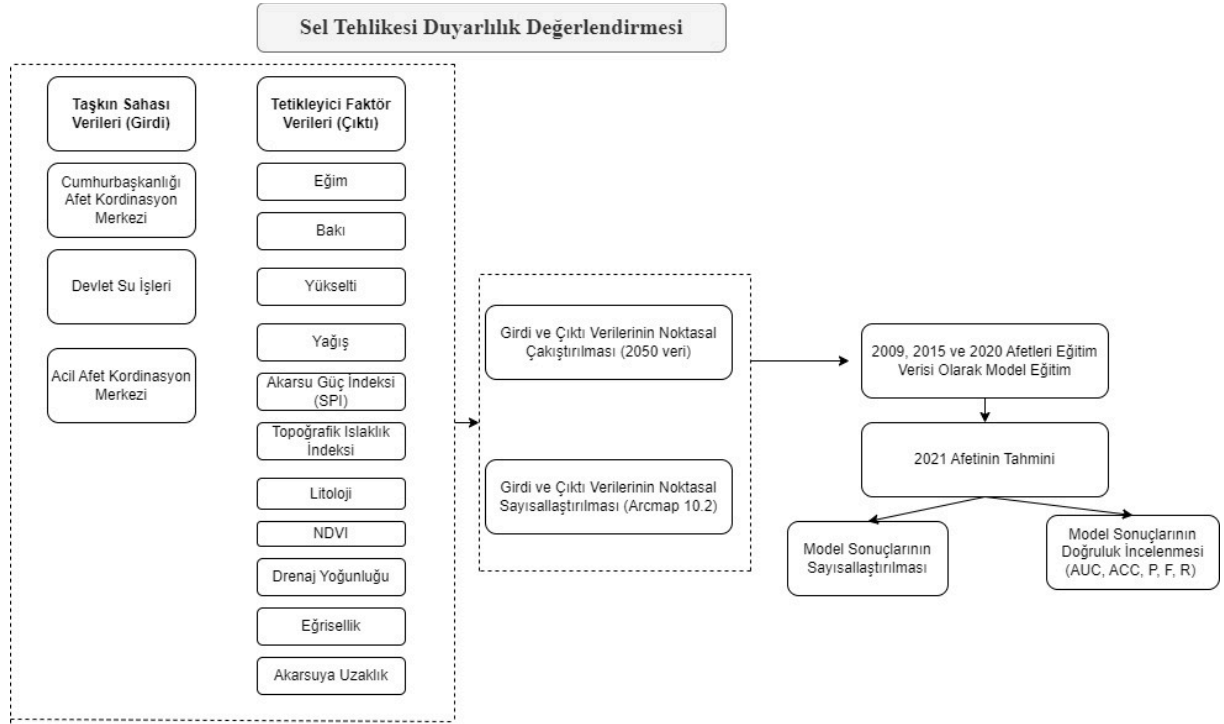
veya ilgili kuruluşların yaptığı akarsu düzenleyici yapıların tahribatı afetin bilançosunu arttırmaktadır. Artvin ilinde yaşanan afetlerde yerleşim yerlerinin sel suları altında kalması afetin bilançosunu arttırmıştır (Şekil 3.)



**Şekil 3.** Taşkın Afetinin Bilanço Görselleri [10-12] (a; 2009 Taşkını, b; 2015 Taşkını, c; 2020 Taşkını, d; 2021 Taşkını).

Çalışmada taşkına etki eden parametreler olarak, yükselti, drenaj yoğunluğu, eğim, baki, yağış, akarsu güç indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, toprak tipi, bitki örtüsü (NDVI), eğrisellik ve akarsuya uzaklık kullanılmıştır. Taşkın tetikleyici faktörlerin seçimi taşkın çalışmalarının en önemli kısımlarındandır. Bu faktörlerin belirlenmesinde çalışma havzasının karakteristiği, taşkına etki eden faktörlerin birbirlerine göre ağırlıkları, veri setlerinde doğruluklar önem arz etmektedir [13-18]. Bu çalışmada kullanılan taşkına etki eden parametreler, Artvin ilinin coğrafik özellikleri ve taşkın konusunda yapılan literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu parametreler, Coğrafi Bilgi Sistemleri Arcmap10.2 yazılımıyla oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan afetlerin haritaları Cumhurbaşkanlığı Afet Koordinasyon Merkezi ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden (DSİ) temin edilmiştir. Havzanın yükselti haritaları için Hava Kuvvetleri Komutanlığı Harita Genel Müdürlüğü'nden veri alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan 2050 adet noktasal verinin 1490 adeti eğitim (2009, 2015 ve 2020 taşkınları) ve 560 adeti (2021 taşkını) eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Oransal olarak veri adetleri, %72 eğitim %28 test verisi olarak dağılmaktadır. Her bir havzada belirlenen taşkın yaşanan ve yaşanmayan noktaların verileri, havzadaki 11 parametre ile eşleştirilmiştir. Bu verilerin (yaşanan ya da yaşanmayan) bulunduğu yerdeki 11 parametre değerleri alınıp girdi değeri olarak kabul edilmiştir. Eğitim verisi olarak belirlenen 1490 adet noktasal çıktı verisine karşılık belirlenen 11 parametredeki 16390 adet girdi verisi eşleştirilmiş ve kullanılan yöntem bu verilerle eğitilmiştir. Ardından test verisi olarak kabul edilen 2021 taşkını için belirlenen 11 parametrenin 6160 adet girdi bilgileri ile modelin çıktı sonuçları alınmıştır (Şekil 4.)



Şekil 4. Çalışmanın Özet Şeması.

## 2.1 Rastgele Orman Yöntemi

Rastgele Orman metodu (ROM), temelinde karar ağaçları bulunan makine öğrenimi yöntemlerinden bir tanesidir [19]. Karar ağaçları çok fazla eğer-ise şartından oluşan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Parametrelerin birbiri arasındaki şartlandırma durumları taşkın çalışmaları için uygun olacağını göstermektedir. ROM 2001 yılında Leo Breiman tarafından geliştirilen bir karar ağacıdır. ROM Tim Kom Ho tarafından geliştirilen rastgele uzay metodu ile torbalama metodunun birleşiminden meydana gelmektedir. Bu nedenle rastgele orman metodu torbalama metodunun gelişmiş bir versiyonu olarak ifade edilir [20].

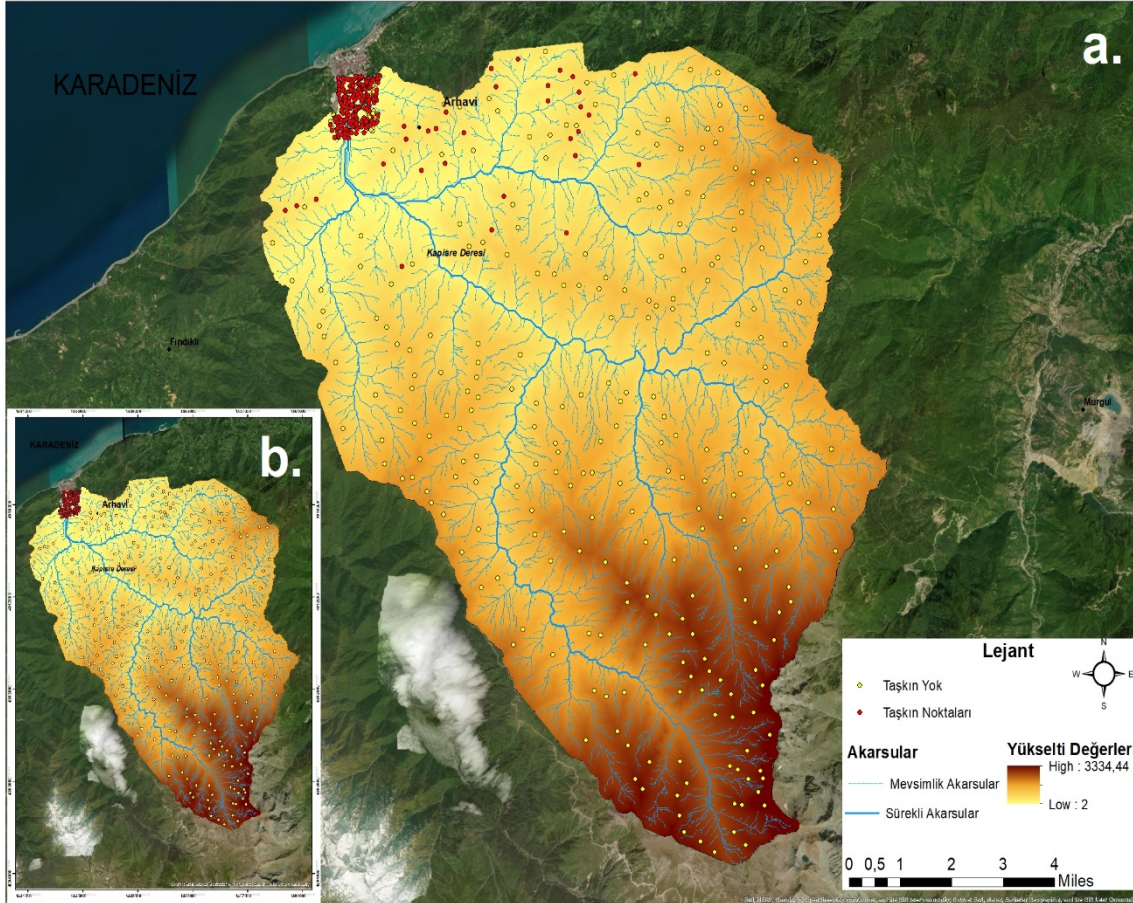
ROM, veri setinin tamamıyla çalışılabildiği gibi eğitim ve test verilerinin ayrılması sonucu olarak da oluşturulabilir. Yöntem, regresyon ağaçları veya sınıflandırmayı oluştururken diğer karar ağaç yöntemlerinden farklı olarak en iyi alt küme olarak bölünebilir ve en iyi değişkeni kullanır [21]. En iyi değişkeninin tespiti amacıyla Rastgele Orman modeli kullanılırken CART modeli de (Classification and Regression Tree) kullanılır [22]. Bu yöntem taşkın, heyelan vb. karmaşık olay örgüsüne sahip doğal afetlerin tahmininde oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır [23].

## 2.2 Doğrulama Metotları

Çalışmada ROM yönteminin bulgularının değerlendirilmesi amacıyla 5 (Auc, Acc, R, P ve F-Score) adet doğrulama metodu kullanılmıştır. Bu metotlardan ilki gerçek doğru ve yanlış pozitif eğrisi altında kalan alan olan Auc (Area under Curve) yöntemidir. Bu yöntem ile model ve gerçek durumlarda pozitif değer olasılığı hesaplanır. Doğruluk (Acc) yöntemi gerçekleşen durumların (yaşanma ya da yaşanmama) tüm durumlara göre modelin doğruluk değerini bulan doğrulama yöntemidir. Recall (duyarlılık) testi gerçekleşmeyen durum için hatalı tahmin yapma olasılığını belirten doğrulama yöntemidir. Kesinlik (P) yöntemi Gerçek ve modelde gerçekleşen noktaların tüm doğru değerlere olasılığını belirtir. F-Score modeli ise P ve R modellerinin harmonik ortalamasıdır. P değeri arttıkça R değeri azaldığından F-Score değeri çalışmanın gerçek başarısını ortaya koyan yöntemdir [24].

### 3. Bulgular ve Tartışma

Artvin ilinde afetler zaman serisi olarak düşünülüp 2009, 2015 ve 2020 yıllarında yaşanan afetler eğitim, 2021 yılında yaşanan afet ise test verisi olarak kullanılmıştır. Yapılan eğitim ile 2021 yılında belirlenen afet sahasındaki 560 noktasal veri tahmin edilmiştir. Kullanılan metoda göre bu afetlerde en etkili 3 parametre yükselti, yağış ve akarsuya uzaklık olarak bulunmuştur. 2050 adet veriyle yapılan çalışmada, tüm veri setinde 157 nokta hatalı tespit edilmiştir. Bu noktalardan 72'si 2021 yılında yaşanan taşkın taşkın maruz kalan alan olup yöntemde taşkın açısından riskli bulunmayarak hatalı sonuç elde edilmiştir. 85 adet veri ise 2001 afetinde taşkın yaşanmayan nokta olup Rastgele orman metoduna göre riskli alan olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda 2021 afeti %88 gibi yüksek bir doğruluk değeriyle tahmin edilmiştir. (Şekil 5). Taşkın afeti çalışmalarının çoğu havzanın yönetimi ve planlamasını sağlamak amacıyla yapılır. Yapılan bu çalışmalar farklı modeller kullanılarak havzanın duyarlılık haritalanmasını çıkarma amacı taşır [25-29]. Bu çalışma eksik veri olan havzaların tahmininde başka havzaların kullanılabilirliğini ortaya koymaya çalışmaktadır. Afet çalışmalarının en zorlu aşamasını veri temini aşaması oluşturmaktadır. Bu çalışma bulguları göstermektedir ki veri temini taşkın çalışmalarında engelleyici bir durum olmamaktadır. Çalışma havzası başka havzalardan eğitilerek bir havzanın taşkın afetinde riskli olan bölgeleri tespit edilmektedir. Çalışma sahasında ve yakınlarında yapılan başka çalışmaların bulguları da yöntemin uyumu ve afet tahmininin başarılı olduğunu göstermektedir [30-32].



Şekil 5. Sonuç Haritası (a; Rastgele Orman Yöntemi, b; Gerçek Durum).

Çalışmanın doğruluk değerlerini tahmin edebilmek için 5 farklı doğrulama yöntemleri kullanılmıştır. 1490 adet eğitim verisi ve 560 adet test verisi olmak üzere toplamda 2050 adet Rastgele Orman yöntemiyle belirlenen veriler gerçek afet sahalari verileriyle irdelenmiştir. Rastgele Orman verileri sonuçlarına göre eğitim verilerinde 0,92-0,94 arasında doğruluk değerlerine, test verilerindeyse 0,87-0,89 arasında doğruluk değerlerine ulaşılmıştır (Tablo 1). Çalışma alanının yükselti değerleri 0 ila 3334 metre arasında değişmekte olup afet yaşanan bölge deniz seviyesine yakın noktada yaşanmaktadır. Sahanın yağış değerleri 1340-2398 mm, eğim değerleri 0 ila 86° arasında

değişmektedir. Havzada alüvyal, kireçsiz kahverengi orman, kırmızımsı sarı podzolik toprak ve yüksek dağ çayırlarından oluşan toprak tipleri bulunmaktadır. Çalışma alanında özellikle Arhavi ilçesi sınırlarında bulunan Cumhuriyet, Musazade ve Boğaziçi mahalleleri taşkın afeti açısından oldukça tehlikeli bir alanlardır. Bu afetin yükselti ve yağış değerleri özellikle afet yaşanan bölgede benzer özellikler göstermiştir. Afetin oluşmasında özellikle yükselti, yağış ve eğim değerleri ciddi tetikleyici parametreler olarak görülmüştür.

**Tablo 1.** Farklı Havzalarla Oluşturulan Rastgele Orman Metodunun Doğruluk Değerleri.

Yöntem	Eğitim	Test
ACC	0,93	0,88
P	0,94	0,87
R	0,92	0,88
F-Score	0,93	0,88
AUC	0,92	0,89

#### 4. Sonuç

Makine öğrenimi yöntemleri son dönemlerde taşkın çalışmalarında giderek artan bir rol almaktadır. Makine öğrenimi yöntemlerinin sonuca etki eden girdi parametreleri arasındaki ağırlıklandırma taşkın afetinin tahmin edilebilirliği konusunda uyum gösterdiği pek çok çalışmayla görülmüştür. Ancak taşkın afetinin gerek afet sahası gerekse taşkın etki eden parametrelerin veri kümelerinde eksiklik veya yokluk bu çalışmaların ise en büyük zorluğudur. Bu nedenle bu konuda yapılan pek çok çalışmada afetin kendi sahasından alınan verilerle kalan kısımları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ancak bu çalışmaların eğitim ve test verileri için havzanın afet sahasının zaten biliniyor olması gerekiyor. Bu nedenle hiç veri bulunmayan sahalarda çalışma yapılmamaktadır. Ayrıca aynı havzadan eğitim durumunda bazı çalışmalarda görüldüğü üzere aşırı öğrenme veya taşkını havza karakteristiklerine göre öğrenme sorunu ile karşılaşılmaktadır.

Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada hiç veri bulunmayan bir havzanın taşkın risk haritaları çıkarılıp o havzada daha önce yaşanan taşkınla öğrenme durumu incelenmiştir. Bu amaçla Türkiye'nin en fazla taşkın maruz kalan illerinden olan Artvin ilinde son dönemlerde yaşanan 4 büyük afeti incelenmiştir. 2009, 2015, 2020 ve 2021 yıllarında bu il sınırlarında afetler yaşanmıştır. Bu çalışmada zaman serisine göre ilk üç afet eğitim verisi olarak Rastgele Orman yöntemiyle eğitilip 2021 yılında yaşanan afet tahmin edilmiştir. Yapılan çalışmada bulunan 2021 afeti havzasındaki afet için riskli ve riskli olmayan olarak tespit edilen 560 nokta, 2021 yılında yaşanan gerçek afet sahası ile mukayese edilmiştir. Çalışma 5 doğruluk modeli ile incelenmiş olup eğitim ve test verilerinde %90'a yakın ve üzerinde doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada görülmektedir ki farklı havzalar ile yapılan taşkın çalışmaları oldukça başarılı sonuçlar vermektedir.

#### Teşekkür

Bu araştırmayı destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Araştırma Fonu (proje no: FDK-2022-2796)'na teşekkür ederiz. Ayrıca veri temininde yardımları için Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- [1] Karim F, Armin MA, Ahmedt-Aristizabal D, Tychsen-Smith L, Petersson L. A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood in undation modeling. *Water* 2023; 15(3): 566.
- [2] Sit M, Demiray BZ, Xiang Z, Ewing GJ, Sermet Y, Demir I. A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources. *Water Sci and Technol* 2020; 82(12): 2635-2670.
- [3] Bentivoglio R, Isufi E, Jonkman SN, Taormina R. Deep learning methods for flood mapping: a review of existing applications and future research directions. *Hydrol and Earth Syst Sci* 2022;26(16): 4345-4378.
- [4] El-Haddad BA, Youssef AM, Pourghasemi HR, Pradhan B, El-Shater AH, El-Khashab MH. Flood susceptibility prediction using four machine learning techniques and comparison of their performance at Wadi Qena Basin, Egypt *Nat Hazard* 2021; 105:83-114.
- [5] Madhuri R, Sistla S, Srinivasa Raju K. Application of machine learning algorithms for flood susceptibility assessment and risk management. *J Water Clim Change* 2021; 12(6). 2608-2623.
- [6] Yukseler U, Toprak A, Gul E, & Dursun, OF. Flood hazard mapping using M5 tree algorithms and logistic regression: a case study in East Black Sea Region. *Earth Sci Inf* 2023; 16(3):2033-47.

- [7] Habibi A, Delavar MR, Sadeghian MS, Nazari B, Pirasteh S. A hybrid of ensemble machine learning models with RFE and Boruta wrapper-based algorithms for flash flood susceptibility assessment. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2023; 122, 103401.
- [8] Saravanan S, Abijith D, Reddy NM, Parthasarathy KS, Janardhanam N, Sathiyamurthi S, Sivakumar V. Flood susceptibility mapping using machine learning boosting algorithm techniques in Idukki district of Kerala India. *Urban Clim*. 2023; 49, 101503.
- [9] Lyu HM, Yin ZY. Flood susceptibility prediction using tree-based machine learning models in the GBA. *Sustainable Cities and Soc*. 2023; 97, 104744.
- [10] DSİ, “Doğu Karadeniz Taşkınları Raporu (1970-1995)”, DSİ Yayınları, Trabzon. 1996.
- [11] DSİ, “Su Dünyası Dergisi”, Sayı: 34, DSİ Vakfı Yayınları, Ankara. 2006.
- [12] DSİ, “Trabzon Taşkınları Raporu (2004,2005,2006)”, DSİ Yayınları, Trabzon. 2006.
- [13] Stefanidis S, Stathis D. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Nat hazards* 2013; 68, 569-585.
- [14] Ouma YO, Tateishi R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and casestudy assessment. *Water* 2014; 6(6): 1515-1545.
- [15] Tokgözlü A, Özkan E. Taşkın risk haritalarında AHP yönteminin uygulanması: Aksu Çayı Havzası örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi* 2018; (44): 151-176.
- [16] Kourgialas N, N Karatzas GP. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrol Sci J* 2011; 56(2): 212-225.
- [17] Mosquera-Machado S, Ahmad S. Flood hazard assessment of Atrato River in Colombia. *Water resour manage*. 2007. 21, 591-609.
- [18] Skakun S, Kussul N, Shelestov A, Kussul O. Flood hazard and flood risk assessment using a time series of satellite images: A case study in Namibia. *Risk Anal* 2014; 34(8): 1521-1537.
- [19] Breiman L. Randomforests. *Mach learn* 2001; 45(1): 5-32.
- [20] Ho TK. TheRandom Subspace Method for Constructing Decision Forests, *IEEE Trans. Pattern Anal Mach Intell* 1998,20: 832-844.
- [21] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by random forest. *R News*. 2002. 2(3), 18- 22.
- [22] Archer KJ, Kimes RV. Empirical characterization of random forest variable importance measures. *Comput Stat Data Anal*. 2008. 52(4), 2249-2260.
- [23] Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognit lett* 2006; 27(8): 861-874.
- [24] Toprak A, Yükseler U, Yıldızhan E. Success of Machine Learning And Statistical Methods İn Predicting Landslide Hazard: The Case Of Elazığ (Maden). *Arabian J Geosci* 2024; 17.10: 1-18.
- [25] Toprak A, Canpolat FA. Frekans Oran, Analitik Hiyerarşi Ve Lojistik Regresyon Modellerinin Taşkın Tehlike Tahmininde Karşılaştırmalı Kullanımı, *Fatsa İlçe Merkezi Ve Yakın Çevresi Örneği*. *Inter J Geo Edu* 2022; (45): 349-379.
- [26] Ayoublu SA, Vafakhah M, & Pourghasemi HR. Efficiency evaluation of low impact development practices on urban flood risk. *J Environ Manage* 2024, 356: 120467.
- [27] Abebe Y, Kabir G, & Tesfamariam S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model. *J Cleaner Prod* 2018; 174: 1629-1641.
- [28] Toprak A, Günek H. Flood Analysis Of Arakonak Stream Basin (Solhan-Bingöl). *Recent Researc Interdis Sci*. 2016. 358.
- [29] Abdrabo KI, Kantoush SA, Esmail A, Saber M, Sumi T, Almamari M, & Ghoniem S. An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Clim* 2023; 48, 101426.
- [30] Yükseler U, Dursun ÖF. Shannon Entropi (SE) ve AHP Metoduyla Artvin (Arhavi) Kapisre Taşkınının İncelenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2024; 29(2): 611-631.
- [31] Yükseler U, Toprak A, Gul E, & Dursun OF. Flood hazard mapping using M5 tree algorithms and logistic regression: a case study in East Black Sea Region. *Earth Sci Inf* 2023; 16(3): 2033-2047.
- [32] Yükseler U, Dursun ÖF. Taşkın Afetlerinin Önceden Tahmin Edilebilirliği; Gümüşhane İlinde Yaşanan Afetlerinin Farklı Yöntemlerle Tahmin Örnekleme. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2024; 11(23): 248-264.



## 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisi Ölçümlerinin Sıkıştırılabilir Algılama Yöntemiyle Analizi

Ali Rıza ALAN<sup>1\*</sup>, Cihan BAYINDIR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

\*<sup>1</sup> alan21@itu.edu.tr, <sup>2</sup> cbayindir@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 20/03/2024;

Kabul/Accepted: 10/09/2024)

**Öz:** Diğer doğal afetler kadar sık meydana gelmeseler de tsunamiler kıyıya yakın ekosisteme çok büyük zararlar verebilir. 30 Ekim 2020'de saat 12:51 p.m. UTC'de (2:51 p.m. GMT+03:00) 6,9 Mw büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Depremin merkez üssü, Türkiye'nin İzmir ilinin yaklaşık 23 km güneyinde, Yunanistan'ın Samos adası açıklarında bulunmaktadır. Bu deprem 30 Ekim 2020'de kendisiyle aynı adı taşıyan İzmir-Samos (Ege) tsunamisine neden olmuştur. Bu araştırmada, gözlemsel verilere uygulanan etkili bir algılama tekniği olan Sıkıştırılabilir Algılama (CS) algoritması kullanılarak bu tsunaminin hidrodinamik zaman serilerinin verimli ölçümlerle geri çatılması incelenmiştir. Bu amaçla UNESCO veri portalının Kos Marina ve Bodrum istasyonlarından elde edilen tsunami zaman serisi kayıtlarından faydalanılmıştır. Tsunami su salınım seviyesi zaman serilerinin ve bu serilerin Fourier spektrumlarının CS algoritmasıyla etkili bir şekilde ölçülerek geri çatılmasının potansiyel uygulaması araştırılmıştır. CS kullanılarak su seviyesi salınımı, yatay ve dikey tsunami hızları, tsunami taşkın debisi zaman serileri gibi tsunami parametrelerinin başarıyla ölçülebileceği, analiz edilebileceği ve kayıt altına alınabileceği gösterilmiştir. Ayrıca gelecekteki potansiyel yönelimler, bulgularımızın kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği de irdelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** 30 Ekim 2020 İzmir-Samos (Ege) tsunamisi, sıkıştırılabilir algılama, zaman serisi analizi.

## Analysis of the 30 October 2020 İzmir-Samos Tsunami Measurements with Compressive Sensing Method

**Abstract:** Although they do not occur as frequently as other natural disasters, tsunamis can cause tremendous damage to the near-shore ecosystem. On October 30, 2020, at 12:51 p.m. an earthquake with a magnitude of 6.9 Mw occurred at UTC (2:51 p.m. GMT+03:00). The epicenter of the earthquake is located off the Greek island of Samos, approximately 23 km south of Turkey's İzmir province. This earthquake caused the İzmir-Samos (Aegean) tsunami, which has the same name, on October 30, 2020. In this research, the efficient reconstruction of the hydrodynamic time series of this tsunami with efficient measurements was examined using the Compressive Sensing (CS) algorithm, which is an effective detection technique applied to observational data. For this purpose, tsunami time series records obtained from Kos Marina and Bodrum stations of the UNESCO data portal were used. The potential application of effectively measuring and reconstructing tsunami water surface fluctuation time series and the Fourier spectra of these series with the CS algorithm has been investigated. It has been shown that tsunami parameters such as water surface fluctuations, horizontal and vertical tsunami velocities, and tsunami flood discharge time series can be successfully measured, analyzed, and recorded using CS. In addition, potential future directions and the usefulness and applicability of our findings are also examined.

**Key words:** 30 October 2020 İzmir-Samos (Aegean) tsunami, compressive sensing, time series analysis.

### 1. Giriş

Tsunamiler, uzun mesafe katederek kaynaklarından binlerce kilometre uzağa ulaşabilen yüzey dalgaları olarak tanımlanır [1-2]. Enerjileri sığ sudaki grup hızı  $\sqrt{gh}$  ile hareket ederler; burada  $h$  su derinliğidir [3]. Tsunamiler; depremler, denizaltı veya atmosferik olaylar, volkanik patlamalar vb. nedenlerle su sütununun yer değiştirmesi ile meydana gelebilir [4]. Tarih boyunca kıyı ve iç bölgelerdeki tsunamiler nedeniyle büyük maddi hasarlar ve can kayıpları yaşanmıştır [1]. Tsunamiler de diğer doğal afetler gibi önlenmesi günümüz teknolojisi ile imkânsız olan ancak bazı bilimsel çalışmalarla etkileri azaltılabilen doğa olaylarıdır. Literatürde bu konuyla ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. 2011 yılındaki büyük Doğu Japonya deprem felaketinin arazi kullanımı ve arazi örtüsünde neden olduğu değişiklikleri değerlendirmek için, afet sonrası 2013 ila 2015 yılları için 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip kesin bir arazi kullanımı ve arazi örtüsü haritası oluşturulmuştur [5]. Tsunaminin arazi kullanımı ve arazi örtüsü üzerindeki coğrafi ve zamansal sonuçlarının yanı sıra Tayland'ın Phang Nga eyaletinde ilgili ekosistem hizmetlerinin mevcudiyetinin değerlendirilmesi ve haritalandırılmasına yönelik bir analiz [6]'da

\* Sorumlu yazar: [alan21@itu.edu.tr](mailto:alan21@itu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-0243-9493, <sup>2</sup> 0000-0002-3654-0469



sunulmaktadır. Japonya'nın Sendai kenti civarındaki kıyı şeridi bölgesinde yaklaşık 4,5 km'lik kıyı normal bölümlünde; erozyon, çökme ve buna bağlı arazi değişikliklerinin 2011'deki Tohoku-oki tsunamisinin bir sonucu olduğu belirlenmiştir [7]. Büyük bir tsunaminin Doğu Japonya'daki alçak bir kıyı bölgesi üzerindeki etkileri, zaman serisi uydu görüntüleri, havadan videolar ve yerden gözlemlerin bir kombinasyonu kullanılarak belirlenmiş ve zırh üniteleri olan bir kıyı şeridi ile olmayan bir kıyı şeridi arasında bir analiz yapılmıştır [8]. Tsunami parametrelerinin, yani su yüzeyindeki dalgalanmanın, hızın ve dalga basınçlarının doğru ölçümü ve modellenmesi için sıkıştırılabilir algılamanın potansiyel kullanımı analiz edilmiştir [9]. Tsunami felaketleri için uydu görüntüleme gibi geleneksel gözlem yöntemleri ile birçok kez inceleme yapılmasına rağmen, eski yöntemlerin yetersizliği ve daha detaylı ve kullanışlı sonuçlara duyulan ihtiyaç nedeniyle daha yeni ve teknolojik yöntemler tercih edilmektedir. Örneğin, uzaktan algılama, uydu görüntüleri kullanılarak tsunamiden zarar görmüş veya zarar görmesi muhtemel bölgelerin haritasını çıkarmayı ve değerlendirmeyi mümkün kılan bir tekniktir [10]. Tsunaminin etki alanlarının büyük olması nedeniyle, uzaktan algılama ve ilgili uygulama teknolojilerindeki son gelişmeler, felaket hasar dağılımını haritalamak ve bir bölgenin riskini belirlemek için uzaktan algılanan görüntü verilerinin kullanılmasını mümkün hale getirmiştir [11]. Yakın zamanda başka bir tsunami olayı 30 Ekim 2020'de saat 12:51 p.m. UTC'de (2:51 p.m. GMT+03:00) 6,9 Mw'lık bir depremden sonra gerçekleşmiştir ve bu olay [12] gibi bazı saha araştırmalarıyla araştırılmıştır. Depremin büyüklüğü ve bunun sonucunda ortaya çıkan 30 Ekim 2020 İzmir-Samos (Ege) tsunami su baskınının özellikleri (tsunaminin yüksekliği ve maksimum tırmanması) yeryüzündeki en yıkıcı olaylar arasında olmasa da felaket sonuçları nedeniyle Türkiye'nin İzmir kıyılarında, özellikle Sığacık kasabasında kıyı toplulukları için kayda değer bir dönüm noktası olmuştur [12]. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos (Ege) tsunamisi ve çevredeki çeşitli bölgelere etkisi son yıllarda araştırmaların ilgi odağı olmuş ve literatürde daha birçok saha araştırması ve çalışmaya yer verilmiştir. Örneğin gözlemsel verilere uygulanan LSTM yapay zekâ algoritması kullanılarak bu tsunaminin hidrodinamiği ve tahmini üzerine çalışmalar yapılmıştır [13]. Samos adasında yürütülen bir diğer saha araştırması [14]'te sunulmaktadır. Tsunami olayının tetiklediği göreceli deniz seviyesi değişiklikleri ve morfolojik etkiler [15]'te analiz edilmiştir. Deprem olayı öncesinde alt iyonosferin istatistiksel ve kritiklik analizi [16]'da gerçekleştirilmiştir.

Öte yandan literatürde tsunami veri analizi için bazı yapay zekâ uygulamaları önerilmektedir. Japonya'nın Osaka Körfezi'ndeki tsunami büyüklüklerinin gerçek zamanlı tahmini [17]'de bir yapay sinir ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme sinir ağı kullanılarak yataklardan gelen tsunami özelliklerinin tahminine yönelik ters bir modelleme tekniği [18]'de incelenmiştir. Evrimsel sinir ağları ve diğer bazı makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tsunami su baskını konusunda erken uyarı gibi bazı çalışmalar da analiz edilmiştir [19-21]. Başka bir çalışmada Tohoku, Japonya için yapay sinir ağını kullanan S-net gözlemlerine dayalı kıyı tsunami tahmini incelenmiştir [22].

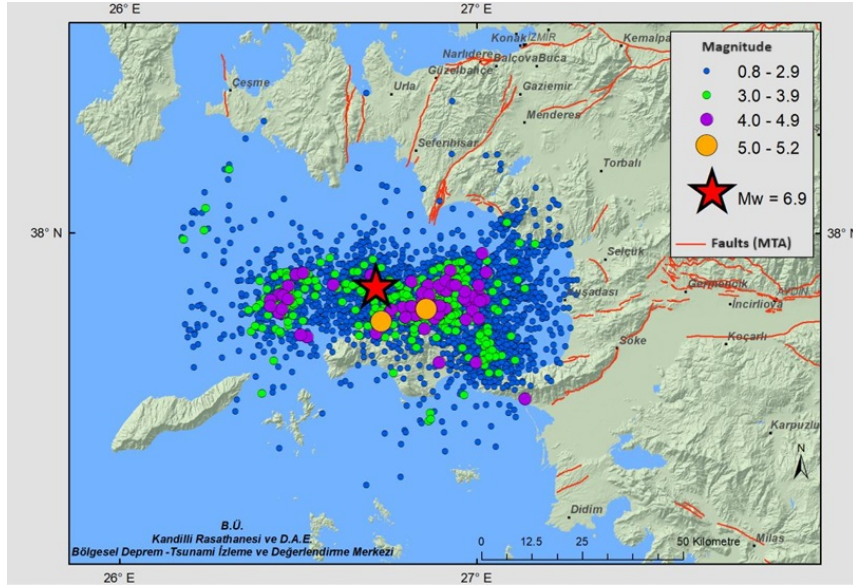
Çok başarılı akıllı algılama yöntemlerinden biri olan CS, ancak çok yakın zamanda tsunami felaketi uygulamalarında ilgi çekmiştir [9, 23]. Bu makale, 30 Ekim 2020 İzmir-Samos tsunamisinin hidrodinamik özelliklerini, yerinde ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak elde edilen verilere uygulanan CS kullanılarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, farklı istasyonlarda akustik yankı cihazı/basınç ölçer ve radar ile elde edilen tsunami su yüzeyi dalgalanma zaman serilerinin geri çatılması incelenmekte ve bunların CS kullanılarak öngörülebilirliği tartışılmaktadır. FFT algoritmaları ile elde edilen verilerin zaman serisi dinamikleri ve spektral özellikleri incelenmektedir. Ayrıca veri setinin toplama türünün hem zamansal hem de spektral alanda tsunami zaman serisi kurtarma performansı üzerindeki etkisi de araştırılmaktadır. Erken uyarıların ve erken uyarı zaman ölçeklerinin olası CS tabanlı algoritmalarla daha verimli olarak ölçülmesi de tartışılmaktadır.

## 2. Metodoloji

### 2.1. Çalışma Alanı

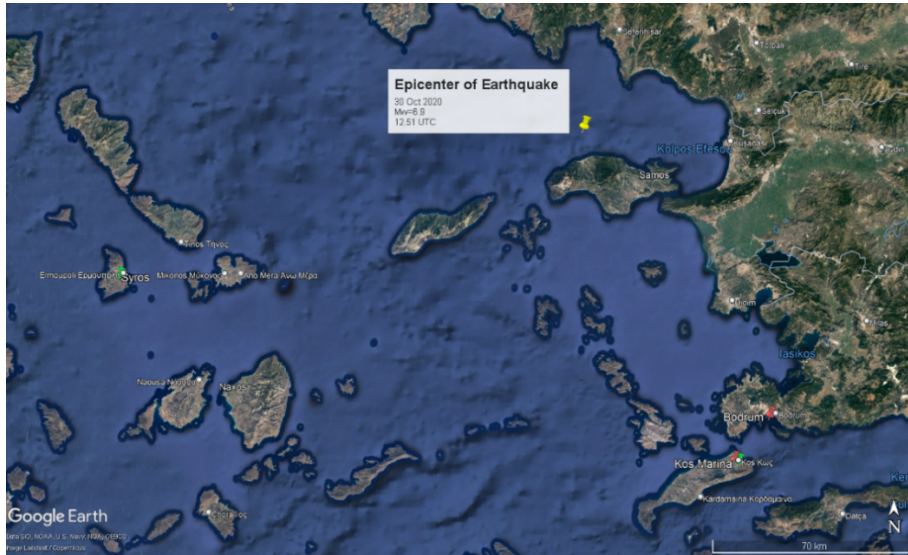
30 Ekim 2020 saat 12:51 p.m. UTC'de merkez üssü İzmir'in yaklaşık 23 km güneyinde, Yunanistan'ın Samos adası açıklarında olan 6,9 Mw moment büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir [24-26]. Depremin kinematik kırılma sürecinden sonra yapılan analiz, iki fay düzleminin hafifçe döndürülmüş doğrultu açılarıyla kademeli olarak kırıldığını ve sırasıyla normal faylanma ve eğik faylanmanın hâkim olduğunu göstermiştir [26]. Deprem özelliklerini analiz etmek için yalnızca sismik ve jeodezik veriler değil, aynı zamanda tsunami verileri de kullanılmıştır [26]. Şekil 1'de gösterilen depremsellik haritası, depremin merkez üssünü ve o gün kaydedilen 5068 artçı sarsıntının yerini göstermektedir [27]. Depremin merkez üssü Samos Adası'na kadar uzanan İzmir-Balıkesir Transfer Bölgesi üzerinde yer almaktadır [26]. 2020 Samos depreminin birincil sismojenik fayının Kaystrios Fayı olduğu düşünülmektedir [26]. Kaystrios Fayı ile yakın çevredeki Ikaria, Fourni ve Pythagorio Fayları karmaşık bir fay sistemi oluşturmaktadır [26]. Bu depremin büyüklüğü ve bunun sonucunda meydana gelen 30 Ekim 2020 İzmir-Samos (Ege) Tsunamisi, Dünya'nın diğer yerlerinde görülen benzerlerine göre çok büyük olmasa da etkili

bir olaydır ve bölge için kritik öneme sahiptir. Depremın tetiklediği tsunami, Türkiye'nin sahil kasabası Sığacık'ta önemli su baskını ve hasara neden olmuştur.



Şekil 1. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Depremi depremsellik haritası [27] (KRDAE ve Prof. Dr. Doğan Kalafat'tan bu şeklin yeniden kullanım izni alınmıştır).

30 Ekim 2020 İzmir-Samos tsunamisinin, deprem merkez üssü ve çevresindeki UNESCO tsunami gözlem istasyonlarıyla birlikte çalışma haritası Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, en yakın UNESCO istasyonları Bodrum, Syros, Kos ve Kos Marina'da bulunmaktadır [28]. Bu çalışmada kullanılan zaman serisi verileri, <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php> adresindeki UNESCO web sitesinden (29 Kasım 2023'te erişilmiştir) indirilmiştir ve genel erişime açıktır.



Şekil 2. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos depreminin merkez üssü ve çevresindeki UNESCO tsunami gözlem istasyonları: Bodrum, Syros, Kos ve Kos Marina [28].

30 Ekim 2020 - 00:00 a.m. - 31 Ekim 2020 - 00:00 a.m. UTC arasındaki günlük veriler yukarıda belirtilen 4 istasyonun Kos Marina ve Bodrum istasyonlarından elde edilmiştir. Kos Marina istasyonunda örnekleme süresinin 1 dakika olduğunu, buna karşın Bodrum İstasyonu'nda örnekleme süresinin 0,5 dakika olduğunu belirtmekte fayda

vardır. Kos Marina istasyonundaki kayıtlar radarla alınırken Bodrum istasyonundaki kayıtlar akustik yankı cihazı/basınç ölçer ile alınmaktadır.

Tsunami parametrelerinin ve spektral özelliklerinin akıllı algılama teknikleriyle yeniden oluşturulması bu makalenin konusunu oluşturmaktadır. Daha spesifik olarak belirtmek gerekirse, CS çok başarılı zaman serisi oluşturma ve kurtarma araçlarından biridir ve 30 Ekim 2020 İzmir-Samos tsunami hidrodinamiğinin başarılı olarak algılanması ve kurtarılması için olası bir aday olarak incelenmiştir. Bir sonraki bölümde CS'nin kısa bir incelemesi verilmektedir ve ilerleyen bölümlerde 30 Ekim 2020 İzmir-Samos tsunamisi verilerinin yeniden oluşturulması CS kullanılarak analiz edilecektir.

## 2.2 Sıkıştırılabilir Algılama Yöntemi

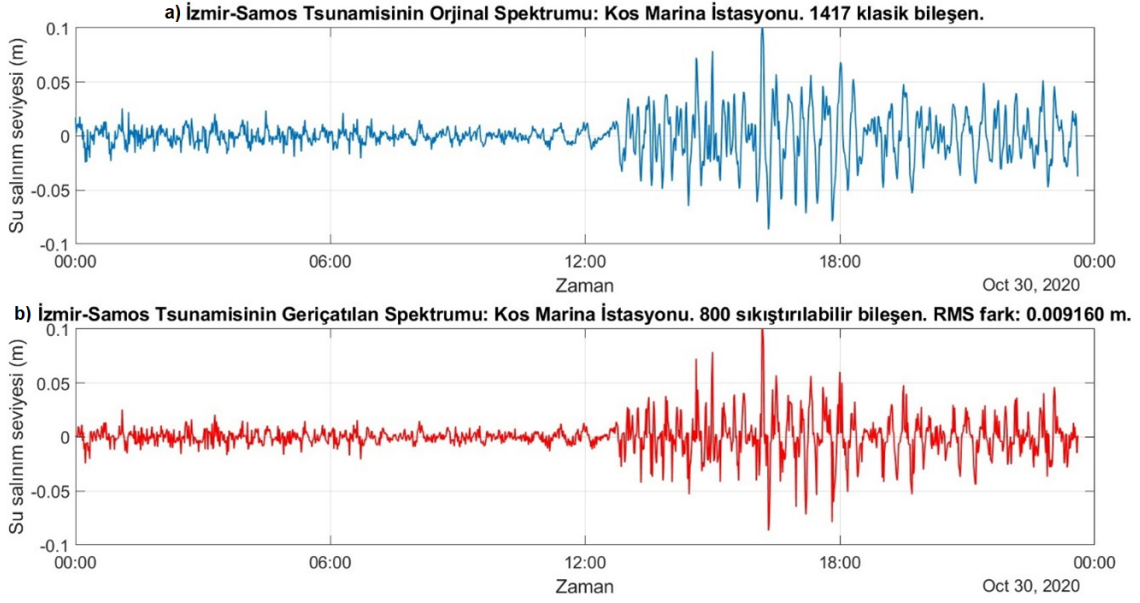
Mühendislikten tıba kadar birçok bilim dalından araştırmacıların ilgisini çeken ve bu araştırmacıların çalışmalarında kullandıkları CS, sinyal işlemede önemli bir atılım gerçekleştirmiştir. CS,  $N$  elemanından yalnızca  $K$ 'sinin sıfırdan farklı olduğu bir  $K$ -seyrek  $q$  sinyalinin,  $\Psi$  matrisi (ortogonal dönüşüm matrisi) tarafından dik bir alana (yani Fourier) dönüştürülebileceğini ispatlamıştır. Böylece sinyalin temsili  $q = \Psi\hat{q}$  olmaktadır. Bu formülde  $\hat{q}$ , dönüşümün katsayı vektörünü göstermektedir. Girişlerden sıfırlar çıkarıldıktan sonra,  $q_s = \Psi\hat{q}_s$  elde edilebilir; burada  $q_s$ , sıfır olmayan bileşenlere sahip sinyal olarak tanımlanmaktadır.  $N$  elemanlı bir  $K$ -seyrek  $q$  sinyali, CS algoritması kullanılarak  $M \geq C\mu^2(\Phi, \Psi)K\log(N)$  ölçümüyle kesin olarak geri çatılabilmektedir. Bu formülde  $C$  pozitif bir sabittir.  $\Phi$  ölçüm matrisini,  $\mu^2(\Phi, \Psi)$  ise algılama ve dönüşüm temeli arasındaki karşılıklı tutarlılığı simgelemektedir [29-30].  $M$  rastgele örnek kullanılarak rastgele örnekleme yapıldıktan sonra  $g = \Phi\Psi\hat{q}$  elde edilir. Böylece CS ile geri çatılma için en iyileme problemi

$$g = \Phi\Psi\hat{q} \text{ şartı altında } \min\|\hat{q}\|_{l_1} \quad (1)$$

olarak özetlenebilir. Burada  $\|\hat{q}\|_{l_1} = \sum_i |\hat{q}_i|$ 'dir. Bu optimizasyon probleminin tüm olası çözümleri arasında  $l_1$  çözümü  $q_{cs} = \Psi\hat{q}$  olmaktadır. Bu çözümdeki en küçükleme dışında ağırlıklı  $l_1$  en küçükleme, ağırlıklı tarama vb. bazı diğer tekniklerle CS'nin daha kapsamlı bir tartışması için okuyucu [29-30] ve bunun kıyı hidrodinamiğindeki uygulamaları için [31-34] referanslarına yönlendirilmektedir. Bu çalışmada CS algoritmasının tsunami zaman serilerinin ölçüm ve analizlerinde olası efektif kullanımı araştırılmıştır.

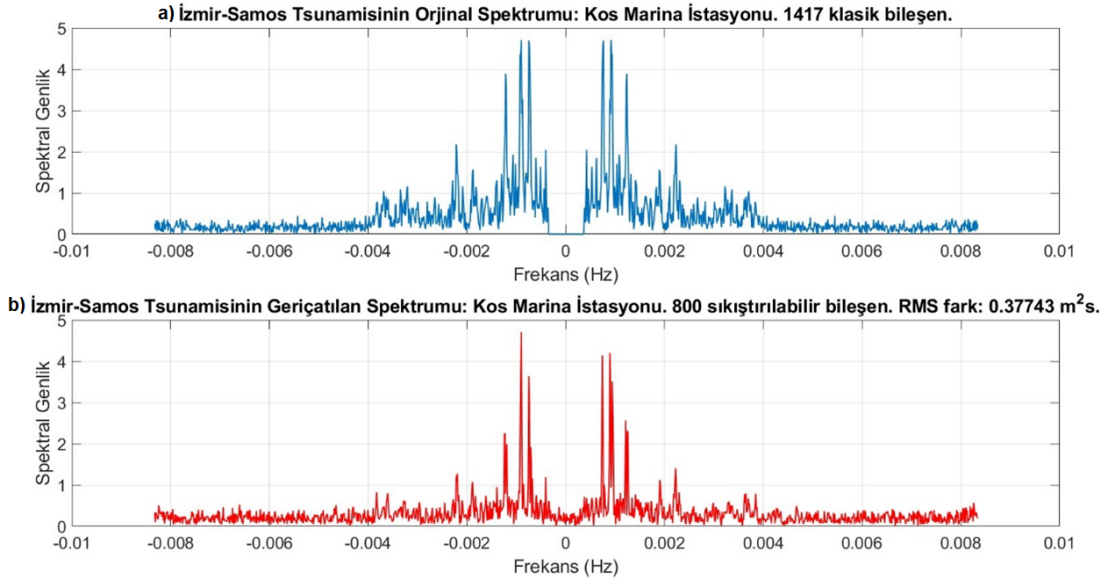
## 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada kullanılan veriler yukarıda bahsedilen UNESCO web sitesinden indirilmiştir ve astronomik gelgit etkisini filtrelemek için spektral bir yaklaşım kullanılarak zaman serileri gelgitten arındırılmıştır. Bu amaçla ortalama sıfırlandıktan sonra FFT-IFFT prosedürü kullanılmıştır. Su yüzeyi dalgalanma spektrumları FFT algoritması aracılığıyla elde edilmiş ve merkezi frekans 0 etrafındaki  $\pm \%0,1$  frekanslar arasındaki merkezi frekanslara karşılık gelen (yaklaşık olarak  $[-3 \times 10^{-5}$  Hz,  $3 \times 10^{-5}$  Hz]) spektral genlikler sıfır dolgulu hale getirilmiştir. Daha sonra, bu filtrelenmiş spektrum, gelgitten arındırılmış tsunami su yüzeyi dalgalanma zaman serisini oluşturmak için bir IFFT algoritması kullanılarak tersine çevrilmiştir. Gelgitten arındırılmış su yüzeyindeki dalgalanma, [enlem: 36,891013, boylam: 27,303632]'da yer alan Kos Marina istasyonunda Şekil 3'te görüldüğü üzere yaklaşık 20 cm mertebesinde bir tsunami dalgası yüksekliğine işaret etmektedir. Yine Şekil 3'te 1417 bileşenden oluşan su yüzeyi dalgalanma zaman serisine sahip Kos Marina istasyonunda sadece 800 bileşen kullanılarak zaman serisinin RMS farkı 0,009160 m ( $< 1$  cm) olacak şekilde elde edilebileceği gösterilmektedir. Tsunami zaman serisinin seyrekliğinin düşük olması sebebiyle klasik sinyalin yaklaşık yarı sayısında sıkıştırılabilir bileşen kullanılarak analize başlanarak buna karşın RMS hata incelenmiş ve 100 lük basamaklarla arttırılan bileşenler için orijinal ve geri çatılan zaman serisi arasındaki RMS hatanın 800 sıkıştırılabilir bileşen için 1 cm'nin altına düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 3. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisinin zaman serisi: Kos Marina İstasyonu a) Orijinal hâli [28] b) CS ile yeniden elde edilmiş hâli.

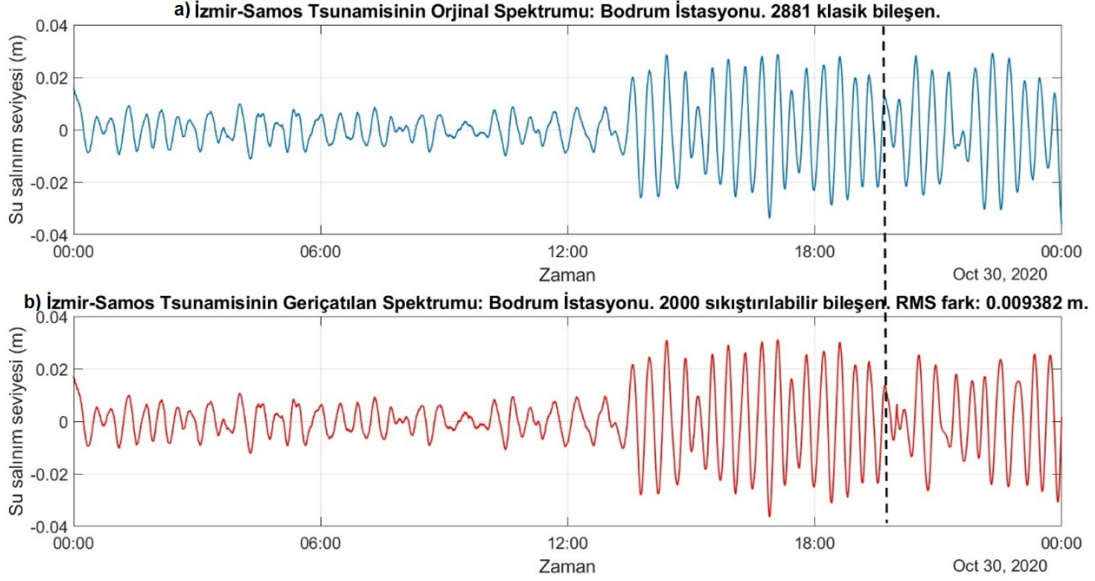
Kos Marina istasyonunda CS kullanılarak elde edilen zaman serisi ile orijinal zaman serisi arasındaki eşleşmeyi daha iyi görselleştirmek için yine spektral bir yaklaşım kullanılmış ve FFT rutinleri aracılığıyla Fourier spektrumu elde edilmiştir. Orijinal durumun ve CS ile elde edilen durumun spektrumu Şekil 4'te gösterilmektedir. İki spektrum arasındaki RMS fark  $0,37743 \text{ m}^2\text{s}$  dir.



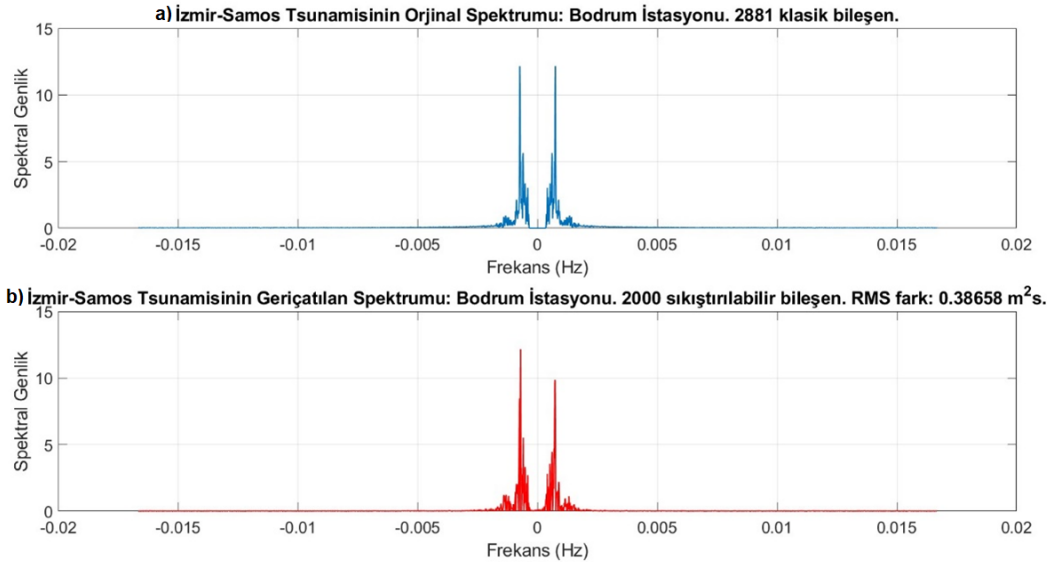
Şekil 4. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisinin zaman serisi Fourier spektrumu: Kos Marina İstasyonu. a) Orijinal hâli b) CS ile yeniden elde edilmiş hâli.

Bu grafiklerden görüldüğü üzere, her ne kadar bazı frekanslarda geri çatım genliklerinde bazı küçük farklılıklar olsa da tsunami analizi için daha önemli olan yüksek genlikli frekanslar ve ilintili genlikler CS ile başarıyla geri çatılmıştır. Ayrıca CS, tsunami öncesi ve sonrası farklılıkları da başarıyla geri çatabilmekte ve tsunaminin başlangıç zamanını belirleyebilmektedir.

Bu çalışmada analizi yapılan bir diğer veri seti ise Bodrum istasyonunda kaydedilmiştir. [Enlem: 37,03217, boylam: 27,423453]'da yer alan ve anakara ile adalar tarafından korunmakta olan Bodrum istasyonunda Şekil 5'te görüldüğü üzere yaklaşık 8 cm mertebesinde bir tsunami dalgası yüksekliği görülmektedir. Yine Şekil 5'te 2881 bileşenden oluşan su yüzeyi dalgalanma zaman serisine sahip Bodrum istasyonunda 2000 bileşen kullanılarak aynı zaman serisinin RMS farkı 0,009382 m ( $< 1$  cm) elde edildiği gösterilmektedir. Sıkıştırılabilir bileşen sayısı olan 2000'in belirlenmesinde yine 100 lük bileşen artışlarına karşılık RMS farkın 1 cm'nin altına inmesi ilkesi uygulanmıştır. Ayrıca Şekil 5'teki siyah renkli kesikli çizgiden sonra gelen kısımda faz uyumsuzluğu olduğu tespit edilmiştir, bu da gelecekteki çalışmalarda CS tabanlı dalgacık (wavelet) dönüşümü analizlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisinin zaman serisi: Bodrum İstasyonu a) Orijinal hâli [28] b) CS ile yeniden elde edilmiş hâli.



Şekil 6. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisinin zaman serisi Fourier spektrumu: Bodrum İstasyonu. a) Orijinal hâli b) CS ile yeniden elde edilmiş hâli.

Önceki istasyonda olduğu gibi CS kullanılarak elde edilen zaman serisi ile orijinal zaman serisi arasındaki eşleşmeyi daha iyi görselleştirmek için FFT rutinleri aracılığıyla elde edilen orijinal spektrum ve CS ile elde edilen spektrum Şekil 6'da gösterilmektedir. İki spektrum arasındaki fark  $0,38658 \text{ m}^2\text{s}$  olarak gözlenmiştir.

CS'nin, özellikle Kos Marina istasyonunda radar ile kaydedilen tsunami zaman serilerini elde etmede RMS farkın küçüklüğü ve orijinal veri sayısında görece daha az sayıda sıkıştırılabilir bileşen kullanılması bakımından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. CS'nin iki farklı istasyondaki faz uyumsuzluğu ve başarı durumu farklı sebeplerden kaynaklanmaktadır. Kos Marina istasyonu zaman serisinin spektral özelliklerinin Bodrum istasyonundaki analizlerden farklılık gösterdiği görülmektedir. Bunun nedenlerinden bazıları, kayıtların akustik yankı/basınç ölçer cihazına göre daha hassas olan radar tarafından yapılmasının yanı sıra, tsunami asimptotiklerinin mesafeye ve çevre batimetrisine göre değişebilmesidir [3]. Yüksek frekanslarda görülen uyumsuzlukları en aza indirmenin olası bir yolu, FFT veya benzer rutinler kullanan bazı frekans bandı filtrelerine sahip bir CS algoritması geliştirmektir. CS'nin tsunami su salınım seviyelerinin yanı sıra uzun dalga teorisi ve yerinde ölçümlerle kolayca elde edilebilecek yatay ve düşey tsunami hızlarının, dinamik basınçları ve tırmanma ve taşkın debileri ve yükseklikleri gibi seyrek zaman serilerinin ölçüm ve analizlerinde de başarılı sonuçlar vereceği kolayca anlaşılabilir. Ölçülen tsunami parametresinin seyreklik özelliklerine göre kesin geri çatılma yapılması da olasıdır.

#### 4. Çıkarımlar

Bu makalede, CS akıllı algılama tekniğinin tsunami hidrodinamiklerine ait verileri yeniden elde etmek için potansiyel uygulaması ele alınmıştır. Bu amaçla çeşitli UNESCO istasyonlarında kaydedilen 30 Ekim 2020 İzmir-Samos tsunamisine ait günlük su yüzeyi dalgalanma zaman serisi verileri analiz edilmiştir. Bu tür zaman serilerinin CS kullanılarak başarılı bir şekilde geri çatılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. Özellikle Kos Marina istasyonu için CS kullanmak daha iyi sonuçlar vermiş olsa da CS'nin daha az bileşenle veri kurtarmada genel olarak başarılı ve tutarlı olduğu gösterilmiştir. Elde edilen verilerin spektral özellikleri de tartışılmış ve yüksek frekanslarda bir miktar uyumsuzluk gözlemlenebilmesine rağmen, CS'nin tsunami zaman serisi spektrumunda oldukça iyi çalıştığı gösterilmiş ve tsunami yükseklik, boy ve oluşum zamanının efektif olarak ölçülmesinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bulgularımız, olayın konumuna ve büyüklüğüne bağlı olarak tsunami erken uyarı sürelerini dakikalardan saatlere kadar artırmak için kullanılabilir. Bu özellikle açık denizdeki bir konumda olay tespit edildiğinde faydalı olacaktır. Olayın kaydedilmesinin ardından açık deniz istasyonlarında ikincil dalgalar ve tsunami asimptotikleri tahmini yapılırken CS ile daha az bileşen kullanılarak tahmin hızı artacak, böylece kıyı bölgeleri için erken uyarı zaman ölçeği artırılabilir ve kıyıdaki su baskını haritaları daha doğru bir şekilde yapılabilecektir. Ayrıca sonuçlarımız, yatay ve sapma hızları ve tırmanma zaman serileri gibi tsunami parametrelerini tahmin etmek için kolayca genişletilebilir. Yakın gelecekte bulguların çeşitli derin öğrenme ağlarına ve doğrusal olmayan süreçlerin zaman serisi tahmin araçlarına genişletilmesi planlanmaktadır [34-35]. Ek olarak, [36-38]'de incelenen gözlemsel veriler veya analitik/sayısal yaklaşımlardan faydalanarak tsunami tırmanması, su baskını özelliklerinin yanı sıra tsunami verileriyle sismik davranışın belirlenmesi, derin öğrenme ve diğer bazı yapay zekâ teknikleri kullanılarak araştırılabilir. Ayrıca bu çalışma CS tabanlı efektif tsunami gözlem alet ve istasyonlarının geliştirilmesi için öncü bir çalışmadır.

#### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA)-Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanlarını Ödüllendirme Programı (GEBİP) ve İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)-Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Fonu tarafından MGA-2022-43528, MDK-2021-42849 proje kodlarıyla desteklenmektedir. Yazar katkıları: C.B., fikir sahibi, A.R.A. ve C.B. konsepti oluşturdu, C.B. kodları yazdı, A.R.A. orijinal taslağı hazırladı, C.B. denetleyip sonuçlandırdı.

#### Kaynaklar

- [1] Ward SN. 2002. Tsunamis. In: Meyers RA, editor. The Encyclopedia of Physical Science and Technology. Academic Press, 2002. Vol. 17, 175-191.
- [2] Chapman C. The Asian tsunami in Sri Lanka: A personal experience. EOS Trans Am Geophys Union 2005; 86: 13-14.
- [3] Berry MV. Tsunami asymptotics. New J Phys 2005; 7: 129.
- [4] Röbbke B, Vött A. The tsunami phenomenon. Prog Oceanogr 2017; 159: 296-322.
- [5] Ishihara M, Tadono T. Land cover changes induced by the great east Japan earthquake in 2011. Sci Rep 2017; 7: 45769.

- [6] Kaiser G, Burkhard B, Römer H, Sangkaew S, Graterol R, Haitook T, Sterr H, Sakuna-Schwartz D. Mapping tsunami impacts on land cover and related ecosystem service supply in Phang Nga, Thailand. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2013; 13: 3095–3111.
- [7] Richmond B, Szczucinski W, Chagué-Goff C, Goto K, Sugawara D, Witter R, Tappin DR, Jaffe B, et al. Erosion, deposition and landscape change on the Sendai coastal plain, Japan, resulting from the March 11, 2011 Tohoku-oki tsunami. *Sediment Geol* 2012; 282: 27–39.
- [8] Tappin DR, Evans HM, Jordan CJ, Richmond B, Sugawara D, Goto K. Coastal changes in the Sendai area from the impact of the 2011 Tohoku-oki tsunami: Interpretations of time series satellite images, helicopter-borne video footage and field observations. *Sediment Geol* 2012; 282: 151–174.
- [9] Bayındır C. Analysis of tsunami and tsunami-structure interaction parameters by compressive sensing. 2<sup>nd</sup> International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME 2021); 1–3 September 2021, Balıkesir, Turkey. 14-19.
- [10] Sambah AB, Miura F. Remote sensing, GIS, and AHP for assessing physical vulnerability to tsunami hazard. *Int J Environ Ecol Eng* 2013; 7: 671–679.
- [11] Yamazaki F, Matsuoka M. Remote sensing technologies in post disaster damage assessment. *J Earthquake Tsunami* 2007; 1: 193–210.
- [12] Doğan GG, Yalçın AC, Yüksel Y, Ulutaş E, Polat O, Güler I, Sahin C, Tarih A, et al. The 30 October 2020 Aegean Sea Tsunami: Post-Event Field Survey Along Turkish Coast. *Pure Appl Geophys* 2021; 178: 785–812.
- [13] Alan AR, Bayındır C, Ozaydin F, Altintas AA. The predictability of the 30 October 2020 İzmir-Samos Tsunami hydrodynamics and enhancement of its early warning time by LSTM deep learning network. *Water* 2023; 15(23): 4195.
- [14] Triantafyllou I, Gogou M, Mavroulis S, Lekkas E, Papadopoulos GA, Thravalos M. The tsunami caused by the 30 October 2020 Samos (Aegean Sea) Mw7.0 earthquake: Hydrodynamic features, source properties and impact assessment from post-event field survey and video records. *J Mar Sci Eng* 2021; 9: 68.
- [15] Evelpidou N, Karkani A, Kampolis I. Relative sea level changes and morphotectonic implications triggered by the Samos earthquake of 30th October 2020. *J Mar Sci Eng* 2020; 9: 40.
- [16] Politis D, Potirakis S, Contoyiannis Y, Biswas S, Sasmal S, Hayakawa M. Statistical and criticality analysis of the lower ionosphere prior to the 30 October 2020 Samos (Greece) earthquake (M6.9), based on VLF electromagnetic propagation data as recorded by a new VLF/LF receiver installed in Athens (Greece). *Entropy* 2021; 23: 676.
- [17] Mase H, Yasuda T, Mori N. Real-time prediction of tsunami magnitudes in Osaka Bay, Japan, using an artificial neural network. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 2011; 137: 263–268.
- [18] Mitra R, Naruse H, Abe T. Estimation of tsunami characteristics from deposits: Inverse modeling using a deep-learning neural network. *J Geophys Res: Earth Surf* 2020; 125: e2020JF005583.
- [19] Makinoshima F, Oishi Y, Yamazaki T, Furumura T, Imamura F. Early forecasting of tsunami inundation from tsunami and geodetic observation data with convolutional neural networks. *Nat Commun* 2021; 12: 2253.
- [20] Fauzi A, Mizutani N. Machine learning algorithms for real-time tsunami inundation forecasting: A case study in Nankai region. *Pure Appl Geophys* 2020; 177: 1437–1450.
- [21] Mulia IE, Ueda N, Miyoshi T, Gusman AR, Satake K. Machine learning-based tsunami inundation prediction derived from offshore observations. *Nat Commun* 2022; 13: 5489.
- [22] Wang Y, Imai K, Miyashita T, Ariyoshi K, Takahashi N, Satake K. Coastal tsunami prediction in Tohoku region, Japan, based on S-net observations using artificial neural network. *Earth Planets Space* 2023; 75: 154.
- [23] Alan AR, Bayındır C. Analysis of wave runup, overtopping and overwash parameters via compressive sensing. 2<sup>nd</sup> International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME 2021); 1–3 September 2021, Balıkesir, Turkey. 110-115.
- [24] Kiratzi A, Papazachos C, Özacar A, Pinar A, Kkallas C, Sopaci E. Characteristics of the 2020 Samos earthquake (Aegean Sea) using seismic data. *Bull Earthquake Eng* 2022; 20: 7713–7735.
- [25] Sboras S, Lazos I, Bitharis S, Pikridas C, Galanakis D, Fotiou A, Chatzipetros A, Pavlides S. Source modelling and stress transfer scenarios of the October 30, 2020 Samos earthquake: Seismotectonic implications. *Turk J Earth Sci* 2021; 30: 699–717.
- [26] Ren C, Yue H, Cao B, Zhu Y, Wang T, An C, Ge Z, Li Z. Rupture process of the 2020 Mw = 6.9 Samos, Greece earthquake on a segmented fault system constrained from seismic, geodetic, and tsunami observations. *Tectonophysics* 2022; 839: 229497.
- [27] KRDAE. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi 30 Ekim 2020 Ege Denizi Depremi Basın Bülteni. 2020. [http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2020/10/20201030\\_izmir\\_V1.pdf](http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2020/10/20201030_izmir_V1.pdf) (Erişim tarihi: 10 Ekim 2023).
- [28] UNESCO/IOC. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission Sea Level Station Monitoring Facility. 2020. <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=stationcode> (Erişim tarihi: 10 Ekim 2023).
- [29] Candès EJ, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on information theory* 2006; 52(2): 489-509.
- [30] Candès EJ. Compressive sampling. *Proceedings of the international congress of mathematicians* 2006; 3: 1433-1452.
- [31] Malara G, Kougioumtzoglou IA, Arena F. Extrapolation of random wave field data via compressive sampling. *Ocean Eng* 2018; 157: 87-95.
- [32] Bayındır C. Early detection of rogue waves using compressive sampling. *TWMS J App Eng Math* 2019; 9(2): 198-205.
- [33] Bayındır C. Compressive spectral method for the simulation of nonlinear gravity waves. *Sci Rep* 2016; 22100.

- [34] Bayındır C, Namlı B. Efficient sensing of the von Karman vortices using compressive sensing. *Comput Fluids* 2021; 104975.
- [35] Bayındır C. Compressive spectral renormalization method. *TWMS J App Eng Math* 2018; 8: 425–437.
- [36] Bueler-Faudree T, Sam D, Dutykh D, Rybkin A, Suleimani A. Fast shallow water-wave solver for plane inclined beaches. *SoftwareX* 2021; 17: 100983.
- [37] Alan AR, Bayındır C. The analytical solutions of long waves over geometries with linear and nonlinear variations in the form of power-law nonlinearities with solid vertical wall. *Ocean Eng* 2024; 295: 117031.
- [38] Alan AR, Bayındır C. The analytical solutions of long waves over geometries with linear and nonlinear variations in the form of power-law nonlinearities with solid inclined wall. *Dyn Atmos Oceans* 2024; 106: 101458.





## Yağ Gülü Hasat Durumunun Belirlenmesi için Siyam Sinir Ağları: Yeni Nesil Bir Bitki Tanıma Sistemi

Birkan BÜYÜKARIKAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Uluborlu Selahattin Karasoy Meslek Yüksekokulu, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye  
\* birkanbuyukarikan@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 15/04/2024;

Kabul/Accepted: 7/8/2024)

**Öz:** Bitki biliminde önemli bir alan olan yağ gülünün hasat durumunu belirlemek, doğal yaşamın anlaşılması ve korunmasında kritik bir rol oynar. Geleneksel yöntemlerle yağ gülünün hasat durumunun sınıflandırılması ve tanınması oldukça karmaşıktır. Bu problemi çözmek amacıyla Evrimsel Sinir Ağı (ESA) tabanlı yaklaşımlar, yağ gülünün hasat durumunu belirlemede başarılı sonuçlar sergilemiştir. Ancak, veri setindeki görüntü sayısının az olması, ESA yaklaşımlarının istenilen performans seviyesine ulaşmalarını engellemektedir. ESA'nın bir türü olan Siyam Sinir Ağları (SSA), bu zorluğa yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. SSA, her bir görüntüyü tanımlayan benzersiz özellik vektörlerini çıkartmakta ve daha sonra bu özellik vektörleri bir mesafe ölçütü kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Sonuç, benzerlik veya farklılık skoruna göre değerlendirilmektedir. Çalışmanın amacı, SSA ile yağ gülü bitkisinin hasat durumunun belirlenmesidir. Çalışmada modellerin değerlendirilmesinde önceden eğitilmiş VGG16 ve VGG19 modelleriyle birlikte farklı kayıp fonksiyon modelleri ile optimizasyon yöntemlerinin kombinasyonları değerlendirilmiştir. Çalışmada Kosinüs benzerliği mesafe ölçütü olarak kullanılmıştır. Deneysel, herkese açık bir veri seti olan Isparta Gülü (Rosa Damascena Mill.)'nde gerçekleştirilmiştir. Yağ gülü hasat durumu sınıflandırma doğruluğu en yüksek, önerilen SSA-VGG19, Karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu ve RMSprop optimizasyon modelindedir. Önerilen bu modelin doğruluk değeri 0,986 ve eğri altında kalan alan (AUC) değeri 0,990 oranlarındadır. Deneysel, yağ gülü hasat durumunun tespitinde önerilen modelin etkili olduğu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Yağ gülü, hasat durumu belirleme, siyam sinir ağları.

### Siamese Neural Networks for Determining Oil Rose Harvest Status: A Next-Generation Plant Recognition System

**Abstract:** Determining the harvest status of oil roses, an important area of botany, plays a critical role in understanding and conserving natural life. Traditional methods for classifying and detecting the harvest status of oil roses are quite complex. To solve this problem, Convolutional Neural Network (CNN)-based approaches have shown successful results in determining the harvest status of oil roses. However, the small number of images in the data set prevents CNN approaches from achieving the desired level of performance. Siamese Neural Networks (SNN), a type of CNN, provides an innovative solution to this challenge. SNNs extract unique feature vectors describing each image and then compare these feature vectors using a distance metric. The result is evaluated based on a similarity or difference score. The aim of this study is to use SNNs to determine the harvest status of the oil rose plant. In this study, different combinations of pre-trained VGG16 and VGG19 models with different loss function models and optimization methods were evaluated. Cosine similarity was used as the distance metric. The experiments were conducted on the publicly available Isparta Gülü (Rosa Damascena Mill.) data set. The highest accuracy for the classification of the harvest status of oil roses was achieved with the proposed SSN-VGG19, Contrastive loss function and RMSprop optimization model. The accuracy of the proposed model is 0.986 and the area under the curve (AUC) is 0.990. The experiments indicate that the proposed model is effective in detecting the harvest status of oil roses.

**Key words:** Oil rose, harvest status determination, siamese neural networks.

#### 1. Giriş

Tıbbi ve aromatik bir bitki olan yağ gülü, gül yağı elde etmek için kullanılan önemli bir gül türüdür. Bu eşsiz bitkiden elde edilen gül yağı, gıda, sağlık ve kozmetik endüstrilerinde kullanılan vazgeçilmez bir hammaddedir [1]. Ancak, yağ gülünden kaliteli yağ elde edilmesi doğru hasat zamanına bağlıdır. Ne var ki, gül hasadı halen daha geleneksel yöntemlerle diğer bir deyişle insan gücüyle gerçekleştirilmektedir. Zamanında hasadın gerçekleştirilememesi, ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, hasat işleminin zamanında gerçekleşmesi için akıllı hasat sistemlerinin benimsenmesi ve uygulanması önemlidir [2]. Bu sistemler, kaliteli ürünler elde etmek için insan emeği kullanımını minimize eder ve bu sistemlerde modern teknolojilerin

\* Sorumlu yazar: [birkanbuyukarikan@isparta.edu.tr](mailto:birkanbuyukarikan@isparta.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-9703-9678

kullanımıyla verimlilik artar [3]. Bitkinin hızlı, doğru ve otomatik olarak tanınmasına olanak tanıyan bu sistemler, geleneksel ve son teknoloji yöntemler yardımıyla çözümler sunar [4].

Araştırmalarda, geleneksel el yapımı özellik çıkarma yöntemleriyle bitki görüntülerinden elde edilen özelliklerin tanımlanması ve sınıflandırılması için klasik makine öğrenmesi (MÖ) metotları tercih edilmiştir. Bu yöntemle yapılan bitki sınıflandırma işlemi; ön işleme, özellik çıkarma ve sınıflandırma gibi adımları içerir [5]. Bu yöntemleri kullanan gül bitkisiyle ilgili araştırmalarda, genellikle yapraklardan gül türü ve hastalıklar sınıflandırılmıştır. Burada, el yapımı özellik çıkarma yöntemleriyle sınıflandırma görevi gerçekleştirilmiştir. Örneğin, [6] çalışmalarında toplamda 100 görüntüden oluşan dört farklı gül bitkisi türünü sınıflandırmak için MÖ'yu kullanmışlardır. Önerdikleri çalışmada en yüksek sınıflandırma doğruluğu, %65 oranıyla k-en yakın komşu algoritmasındadır. [7] gül yapraklarının histogram ve doku özelliklerini MÖ tabanlı metotlarla sınıflandırmışlardır. Önerdikleri çalışmada, rastgele orman (RO) modelinin, kullanılan diğer modellere göre daha iyi performans sonuçları sergilediğini belirtmişlerdir. [8] gül yaprağından hastalıkların tespiti için MÖ kullanmışlar ve RO modelinde etkili sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. [9] gül yapraklarından çıkarılan özellikleri MÖ ile sınıflandırmışlardır. [10] çalışmalarında gül toplamak için MÖ tabanlı bir tarım robotu geliştirmişlerdir.

Son 5 yıldaki araştırmalarda, derin öğrenme tabanlı bitki görüntüsünün sınıflandırılması, bitkinin hızlı, doğru ve otomatik olarak tanınması uygulamalarında umut verici sonuçlar ortaya koymuştur [11]. Bu avantajı kullanan araştırmacılar, gül bitkisini sınıflandırmak için derin öğrenme mimarilerinden evrimsel sinir ağlarını (ESA) başarıyla uygulamışlardır. Örneğin, [2] yağ güllü bitkisinin hasat durumunu belirlemek için destek vektör makineleri, VGG16, VGG19 ve InceptionV3 modellerini kullanmışlardır. Önerdikleri VGG19 modeli %97,96 oranında doğruluk elde etmiştir. Önerdikleri çalışmada, hasat edilebilir ve hasat edilemez olmak üzere ikili sınıflandırma kullanılmıştır. [12] taze kesilmiş gülün kalitesine ilişkin gerçek zamanlı bir uygulama geliştirmişlerdir. Önerdikleri çalışma, ShuffleNet V2 mimarisi temeline dayanmakta ve bu mimariyle %98,891 ile %99,915 oranları arasında bir sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. [13] farklı gül türlerini sınıflandırmak için ESA ve RO birleşiren bir model kullanmışlardır. Önerdikleri yaklaşımda toplam 5367 görüntü kullanılmış ve ortalama kesinlik değerinin %91,76 oranında olduğunu belirtmişlerdir. [14] gül türlerini sınıflandırmak için ESA kullanmışlar ve önerdikleri ESA modeli %85 doğruluk göstermiştir. Önerdikleri çalışmada, gül türü sınıf sayısının altı olduğunu belirtmişlerdir. Az sayıda olan bu çalışmalar, gül bitkisinin hasat durumunu belirlemede henüz yeterince araştırılmadığını göstermektedir. Özellikle, gül bitkisinin hasat durumunun ve gül kalitesinin belirlenmesine yönelik araştırmalarda ESA'nın kullanılması, gelecekteki çalışmalar için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

ESA, genellikle eğitim sürecinde çok derin ağlar kullanmaları nedeniyle yüksek hesaplama gücüne ve büyük etiketli verilere gereksinim duyar [5]. Ancak, ESA az sayıda veriyle eğitildiğinde, model genellikle başarısız sonuçlar üretebilir. Siyam sinir ağları (SSA), bitki tanıma sistemlerinde yeni bir nesil teknoloji olarak öne çıkmaktadır. ESA'nın bir türü olan SSA, az sayıdaki örnekle bile başarı sağlayabilen bir modeldir [15-18]. Ayrıca, ESA veri setindeki görüntülerin hangi sınıfa ait olduğunu dikkate alırken, SSA örnek çitlerinin birbirine benzeyip benzemediğine odaklanır [18]. SSA, ulusal ve uluslararası literatürde birçok alanda kullanılan bir araştırmadır. Genellikle imza tanıma [19], yazı karakteri tanıma [20, 21] ve kişi doğrulama [18] gibi kişisel bilgilerin kullanıldığı çalışmalarda SSA'nın uygulandığı görülmektedir. Ayrıca, görüntülerden kusur tespiti [22] ve hastalık tespitinin [15, 23-25] yanı sıra, son zamanlarda tarım alanında bitki hastalığının tespiti [5, 26] gibi çalışmalarda da SSA'nın kullanımı bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, yağ güllü bitkisinin hasat durumunun belirlenmesi için SSA'nın kullanımı incelenmiştir. Çalışmada, Kaggle'den elde edilen Isparta Gulu (*Rosa Damascena* Mill.) veri seti üzerinde gerçekleştirilen analizlerle, SSA'nın potansiyelinin ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Bu veri seti toplanabilir ve toplanamaz olmak üzere iki sınıftan oluşmaktadır. Çalışmada, öncelikle veri setindeki görüntülerin arka planları çıkarılmıştır. Daha sonra, bazı anlamsız görüntülerin veri setinden silinmesi sonucunda 877 görüntü (241 toplanamaz ve 636 toplanabilir) üzerinde uygulama gerçekleştirilmiştir. Veri setindeki görüntüler %80 eğitim ve %20'si test olacak şekilde ayrılmış ve eğitim ile test setleri için görüntü çiftleri oluşturulmuştur. Çalışmada VGG16 ve VGG19 modelleri SSA'nın yapısına göre yeniden düzenlenmiştir. Görüntüleri karşılaştırmak için mesafe ölçütü olarak Kosinüs benzerliği, kayıp fonksiyonu için İkili çapraz entropi (Binary cross-entropy) ile Karşılaştırmalı kayıp (Contrastive loss) modelleri ve optimizasyon yöntemi için de Adam, Adamax, Nadam ve RMSprop fonksiyonlarının kombinasyonları kullanılmıştır.

Bu çalışma, yağ güllü hasat sürecini modernize etmek ve bitki tanıma sistemlerini geliştirmek için bir adım olacaktır. Küçük ve sınıf dengesizliğine sahip yağ güllü görüntülerinden hasat durumunu belirlemek için SSA'nın kullanılması, bu çalışmanın önemli bir katkısını oluşturur.

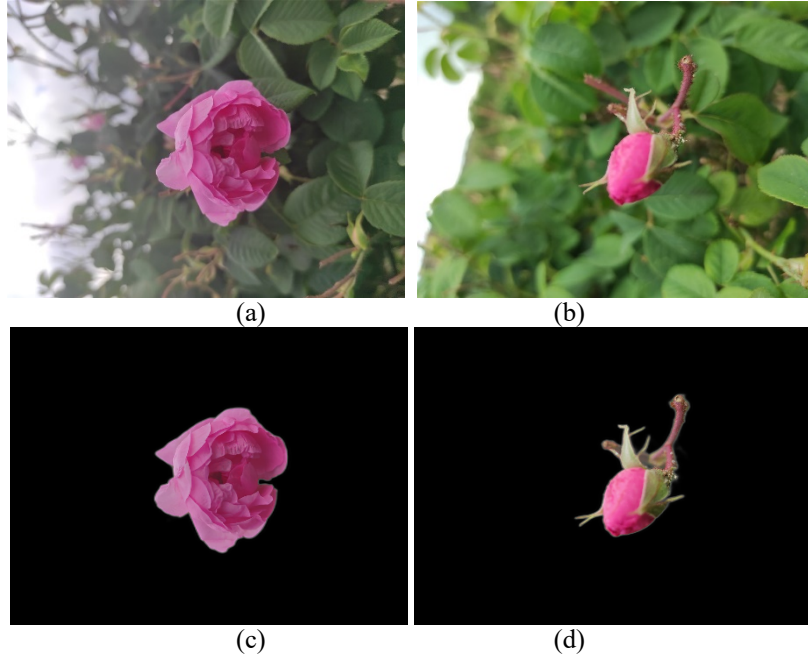
## 2. Materyal ve Yöntem

Bu bölüm, veri seti ve üzerinde uygulanan ön işlemleri, SSA'nın temelini, önerilen sınıflandırıcı yaklaşımı ve değerlendirme ölçütlerini içerir. Tüm bu içerikler sırasıyla alt başlıklar altında toplanmıştır.

### 2.1. Veri seti ve ön işleme

Çalışmada, herkese açık olarak Kaggle platformunda bulunan Isparta Gulu (*Rosa Damascena* Mill.) veri seti kullanılmıştır [27]. Veri setindeki görüntüler, Isparta ili Atabey, Gönen, Keçiborlu ve Merkez ilçelerindeki gül bahçelerinden, 64 MP kamera çözünürlüğüne sahip olan Xiaomi Redmi Note 9 Pro cep telefonu kamerasıyla elde edilmiştir. Görüntüler 2021 yılı mayıs ayında, farklı günlerde (güneşli ve bulutlu hava koşulları), farklı yükseklik ve açılardan çekilmiştir. Kaggle'dan indirilen veri setindeki 961 görüntünün, 282'si hasat edilemez (toplanamaz) ve 679'u hasat edilebilir (toplanabilir) şeklindedir [2]. Veri setinde toplanamaz sınıfı tüm görüntülerin yaklaşık %29'unu ve toplanabilir sınıfı ise tüm görüntülerin yaklaşık %71'ini oluşturmaktadır. Dolayısıyla veri setindeki sınıflar arasında herhangi bir denge bulunmamaktadır. Şekil 1'de, veri setinde toplanabilir ve toplanamaz yağ gülü bitki sınıfına ait örnekler görülmektedir (Şekil 1a ve Şekil 1b).

SSA modellerinin sadece görüntülerdeki yağ güllerine odaklanabilmesi için görüntülerin arka planlarının kaldırılması önemlidir. Veri setindeki görüntülerin arka plandan ayrılması için U2-Net tabanlı rembg fonksiyonu kullanılmıştır (Şekil 1c ve Şekil 1d). Arka plan çıkarılması sonucunda bazı görüntülerden anlamlı sonuçlar elde edilememiş, dolayısıyla bu görüntüler veri setinden çıkarılmıştır. Bu bağlamda, 877 görüntü içeren yeni veri setinin toplanamaz sınıfında 241 ve toplanabilir sınıfında 636 görüntü bulunmaktadır. Bu yeni veri setindeki görüntülerin yaklaşık %28'si toplanamaz ve yaklaşık %72'sini toplanabilir sınıfını oluşturmaktadır. Daha sonra bu veri setindeki görüntüler 224 x 224 x 3 piksel boyutuna uyarlanarak, %80'i eğitim seti ve %20 test seti olacak şekilde ayarlanmıştır. Ardından görüntüler 1/255 oranında ölçeklendirilmiştir. Son olarak, SSA yapısı için eğitim ve test setleri hedef görüntü ile referans görüntü olacak şekilde ilişkilendirilerek ikili çiftler oluşturulmuştur.



Şekil 1. Isparta Gulu (*Rosa Damascena* Mill.) veri seti, (a) Toplanabilir (orijinal görüntü), (b) Toplanamaz (orijinal görüntü), (c) Toplanabilir (arka planı silinmiş), (d) Toplanamaz (arka planı silinmiş).

### 2.2. Siyam sinir ağları (SSA)

SSA, aynı ağırlık ve mimariyi paylaşan iki simetrik sinir ağ yapısıdır. Bu özel yapı, iki örneği girdi olarak alır ve ESA yardımıyla görüntülere ait özellik vektörlerini çıkarır. İki örnek arasındaki benzerlik veya farklılığın öğrenilmesi, genellikle özellik vektörleri arasındaki mesafenin bir ölçüt yardımıyla ölçülmesine dayanır [26, 28]. Literatürde Öklid mesafesi, Manhattan mesafesi, Minkowski mesafesi ve Kosinüs benzerliği gibi ölçütler bulunmaktadır. Çalışmalarda özellikleri temsil eden bu vektörler arasındaki benzerlik veya farklılıkları ölçmek

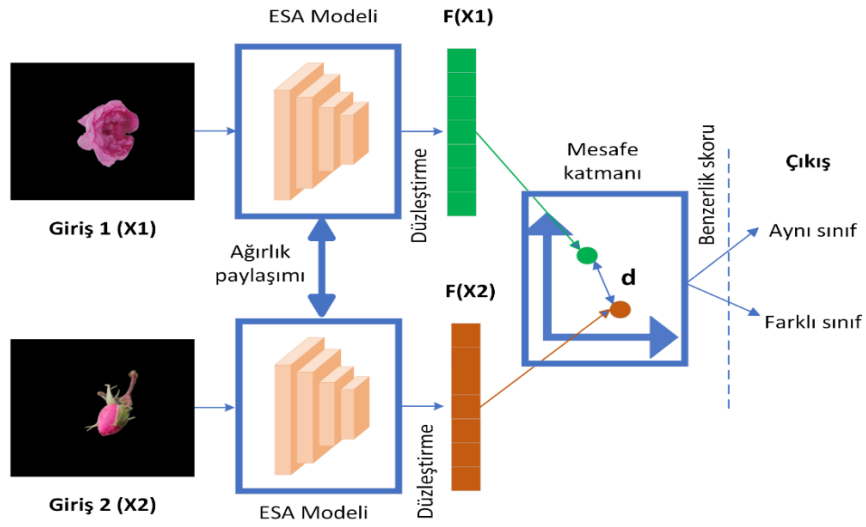
için yaygın olarak Kosinüs benzerliği kullanılır [29]. Kosinüs benzerliği, özellikler arasındaki açıyı ölçen bir ölçüttür. Bu çalışmada, Kosinüs benzerliği yardımıyla özellikler arasındaki benzerlikler ölçülmüştür.

Şekil 2, SSA tabanlı yağ güllü hasat durumunu tanımaya yönelik genel bir bakış sunmaktadır. Önerilen SSA, aynı anda iki farklı yağ güllü görüntüsünü girdi olarak alan iki alt ağdan oluşmaktadır. Her iki alt ağdan elde edilen çıktı özellikleri, karar verme sürecinde kullanılan Kosinüs benzerlik ölçütüyle karşılaştırılır. Bu benzerliğin hesaplanmasına ilişkin formül, Denklem 1’de verilmiştir.

$$d(F(X1), F(X2)) = \frac{F(X1).F(X2)}{\|F(X1)\|\|F(X2)\|} \quad (1)$$

Denklem 1’de, ilk yağ güllü görüntüsünün (X1) özellik vektörünü F(X1) ve İkinci yağ güllü görüntüsünün (X2) özellik vektörünü F(X2) ifade eder. Burada X1 ve X2 oluşturulan görüntü çiftidir.

Şekil 2’de de görüldüğü gibi, X1 ESA modelindeki evrişim katmanlarından ve tam bağlantılı bir katmandan geçtikten sonra bir özellik vektörü (F(X1)) elde edilir. X2, aynı katmanları, ağırlıkları ve parametreleri paylaşan ESA modelinden geçirilir ve ardından ikinci özellik vektörü (F(X2)) çıkarılır. Daha sonra özellik vektörleri arasındaki Kosinüs benzerliği hesaplanarak karşılaştırılır [30]. Burada, F(X1) ve F(X2) benzerse Kosinüs benzerliği yüksek, F(X1) ve F(X2) farklıysa Kosinüs benzerliği de düşüktür.



Şekil 2. SSA'nın genel anlatımı.

### 2.3. Önerilen yöntemin genel çerçevesi

Duman ve Kayaalp özellikle VGG16 ve VGG19 gibi derin öğrenme yöntemlerinin, yağ güllü bitkisinin hasat durumunun otomatik olarak tespit edilmesinde oldukça etkili olabileceğini belirtmişlerdir [2]. Dolayısıyla çalışmada önceden eğitilmiş farklı ESA modelleri denenmiş ancak yağ güllü hasat durumunun belirlenmesi için çalışmada VGG16 ve VGG19 modelleri tercih edilmiştir [2, 31]. VGG16 ve VGG19 modelleri derinlik ile ağırlık yeteneği arasındaki ilişkiyi temsil etmek için sırasıyla 16 ve 19 derinlik katmanı üzerine kurulmuştur. VGG16, 13 evrişim katmanına ve VGG19, 16 evrişim katmanına sahiptir. Bunlara 3 tam bağlantılı katman eklenerek modeller oluşturulmuştur. Genel olarak, VGG16 ve VGG19 modellerinin tam bağlantılı katmanlarındaki nöron sayıları sırasıyla 4096, 4096 ve 1000'dir [32].

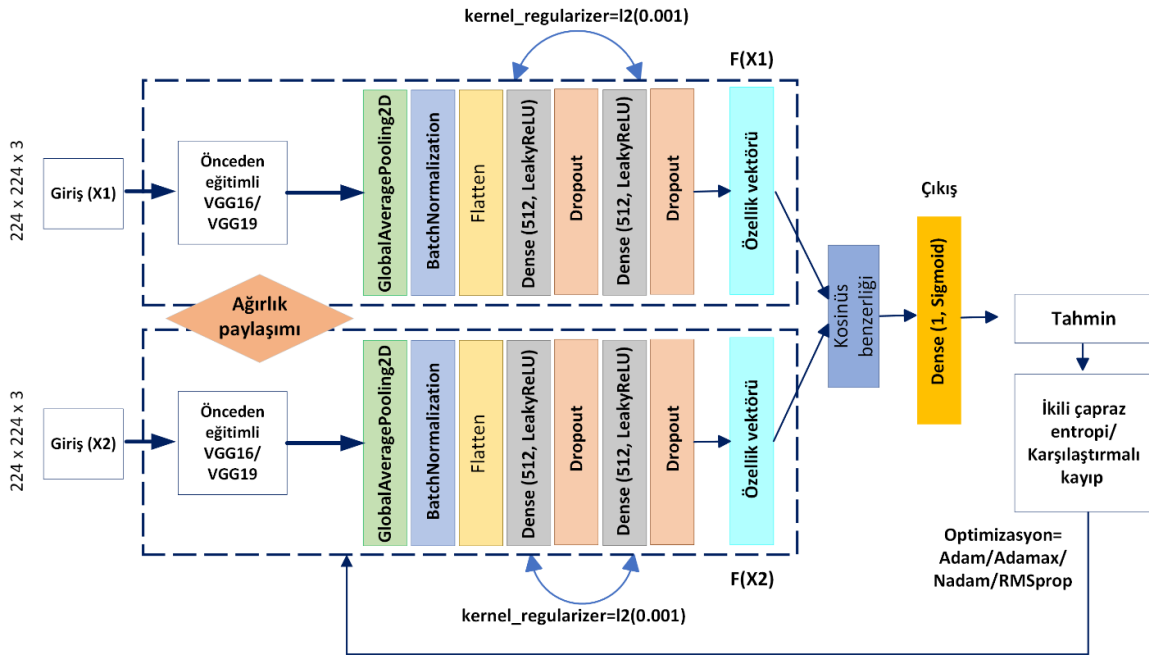
Şekil 3, aynı ağırlık, parametre ve mimariyi paylaşan iki simetrik sinir ağı yapısına sahip, SSA yaklaşımının detaylarını sunmaktadır. Çalışmada VGG16 ve VGG19 modelleri üzerinde ince ayar yapılarak eğitim süreci gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, önceden eğitilmiş modellerin tüm katmanları dondurulmuştur. Daha sonra bu modellere küresel ortalama havuzlama (GlobalAveragePooling2D), yığın normalleştirme (BatchNormalization) ve düzleştirici (Flatten) [33] katmanları eklenmiştir. Bu katmanları, 512 nöronlu ve 128 nöronlu Dense katmanları takip etmektedir. Her iki Dense katmanından sonra 0,5 oranında seyreltme katmanı eklenmiştir. Burada, küresel ortalama havuzlama katmanı, özellik haritalarının doğrusal dönüşümleri yapması ve yığın normalleştirme katmanı, eğitim süresinin azaltılması ve modelin daha iyi performans sergilemesi için kullanılmıştır.

ESA modellerinin Dense katmanlarında genellikle ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılsa da ölü nöron problemiyle başa çıkmak için bu çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak LeakyReLU tercih edilmiştir. Bu aktivasyon fonksiyonu Denklem 2’de görülmektedir [34]. Ayrıca, çalışmada aşırı uyum problemi azaltmak için çekirdek düzgünleştirici olarak L2 fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışmada, L2 düzenlemesinin değeri 0,001’dir.

$$LeakyReLU = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0.01 * x & x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Denklem 2’de, x girdi değerini ifade eder.

Tüm bu katmanlardan elde edilen özellikler, Kosinüs benzerlik ölçütüyle (Denklem 1) ayırt edildiği bir benzerlik kontrolünden geçirilmiştir. Ayırt edilen özellik, verilen girdiye benzer veya farklı olup olmadığını gösteren bir Sigmoid fonksiyonuyla son katmana iletilmiştir. Son katman, 1 nöronlu bir Dense katmandır. Sonuç olarak, Sigmoid aktivasyon fonksiyonuyla 0-1 değer aralığında bir çıkış değeri üretilir. Bu çıkış değeri, iki girdinin birbirine anlamsal olarak ne kadar benzeyip benzemediğini belirtir.



Şekil 3. Önerilen yöntemin ağ yapısı.

Deneylerde kayıp fonksiyonları olarak İkili çapraz entropi ve Karşılaştırmalı kayıp tercih edilmiştir. Bu kayıp fonksiyonlarına ilişkin formüller sırasıyla Denklem 3 ve Denklem 4’te görülmektedir [34].

$$Kayıp = -(y \log(d) + (1 - y) \log(1 - d)) \quad (3)$$

$$Kayıp = yd^2 + (1 - y) \max(marj - d, 0)^2 \quad (4)$$

Denklem 3 ve Denklem 4’te, d gerçek ve y tahmin edilen çıktıyı ifade eder. Burada marj değeri 1 olarak tanımlanan bir sabittir.

Maliyet fonksiyonunu en aza indirmek ve model parametrelerini azaltmak için eğitim aşaması, Adam, Adamax, Nadam ve RMSprop optimizasyon algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller 100 devirde eğitilmiştir. Çalışmada yığın boyutu 64, ilk öğrenme oranı 0,001 ve ağırlık azalma katsayısı 1e-6 olarak seçilmiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan parametreler ve bu parametrelerin değeri Tablo 1’de listelenmiştir.

**Tablo 1.** Modellerin parametre ve değerleri.

Parametre	Değerler
Görüntü boyutu	224 x 224 x 3
Model	VGG16 ve VGG19
Aktivasyon fonksiyonu	LeakyReLU
Çekirdek düzgünleştirici	L2=0,001
Optimizasyon yöntemi	Adam, Adamax, Nadam ve RMSprop
Öğrenme oranı	0,001
Ağırlık azalma katsayısı	1e-6
Devir sayısı	100
Yığın boyutu	64
Kayıp fonksiyonu	İkili çapraz entropi ve Karşılaştırmalı kayıp

## 2.4. Performans değerlendirme

Çalışmanın performansının ölçülmesi için doğruluk (Denklem 5), kesinlik (Denklem 6), duyarlılık (Denklem 7) ölçütleri karışıklık matrisinden elde edilen doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP) ve yanlış negatif (YN) değerlerine göre belirlenmiştir.

$$\text{doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (5)$$

$$\text{kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (6)$$

$$\text{duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (7)$$

Modellerin sınıfları tahmin olasılık değerlerinin avantaj ve dezavantajlarını belirlemek için alıcı işlem karakteristiği (Receiver Operating Characteristic, ROC) eğrisi kullanılabilir. Eğrideki sınıflandırıcıların performansları, eğri altında kalan alan (AUC) değerine göre değerlendirilmiştir. AUC değeri, 1'e ne kadar yakında sınıflandırma performansı da o kadar güçlüdür [26]. Denklem 8, AUC değerinin hesaplanması için kullanılır.

$$AUC = \frac{1}{2} * \frac{DP}{DP+YN} + \frac{DN}{DN+YP} \quad (8)$$

Eğitim için modelin kesin genelleştirme farkının bilinmesi için Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error, MSE) kullanılabilir [23]. Çalışmada önerilen modellerin performansı; doğruluk, MSE, karışıklık matrisi, ROC eğrisi, AUC değeri, Kesinlik-Duyarlılık grafiğine göre incelenmiştir.

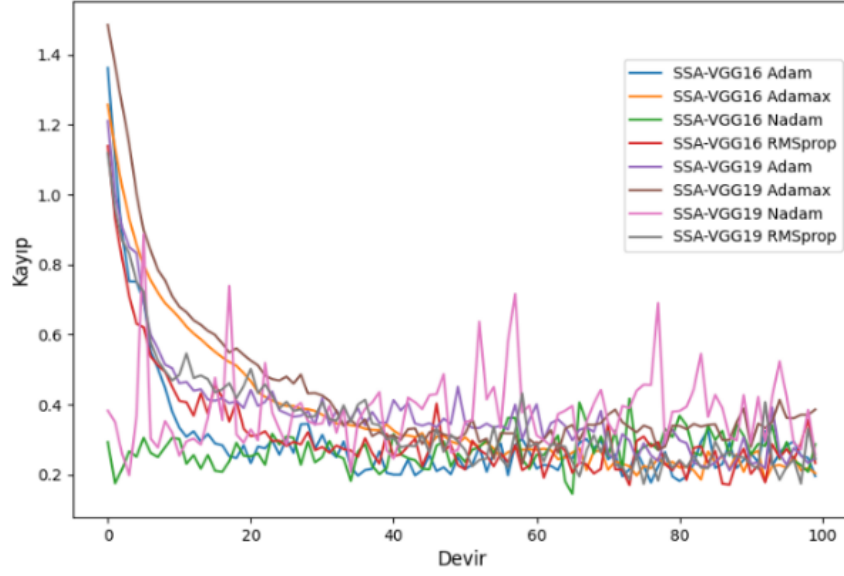
## 3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada toplanabilir ve toplanamaz yağ güllü bitkisine ait görüntülerin bulunduğu Isparta Gulu (Rosa Damascena Mill.) veri seti kullanılmıştır. Çalışmanın ön işlem aşamasında, veri setindeki görüntülerin arka planları çıkarılmıştır ve deneylerde 877 adet görüntü kullanılmıştır. Çalışmada önceden eğitilmiş VGG16 ve VGG19 modelleri kullanılmış ve tüm deneysel çalışmalar Python dili ile Google Colab yazılımında gerçekleştirilmiştir.

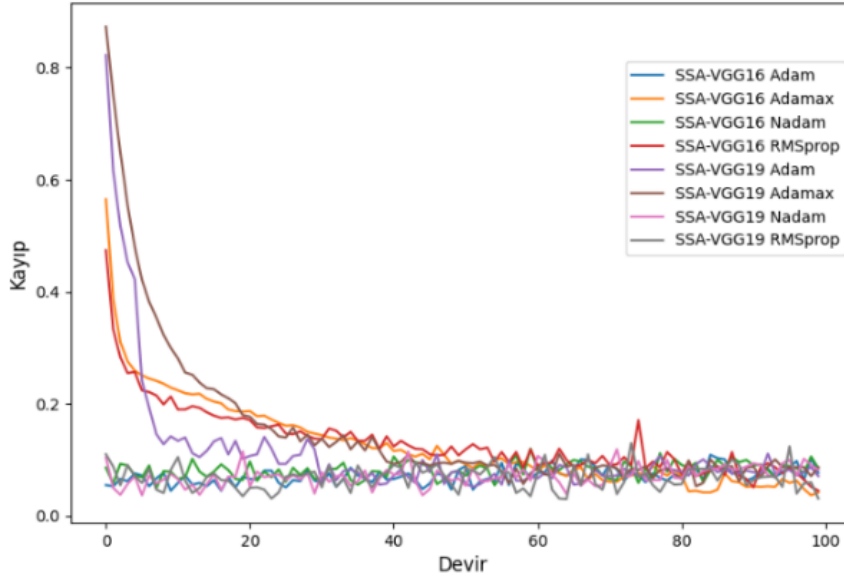
### 3.1. Deneysel sonuçlar

ESA modellerinin SSA ile yeniden değerlendirilmesi sonucunda oluşturulan SSA-VGG16 ve SSA-VGG19 modellerinin, test seti kayıp ve doğruluk değerlerinin grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre; Şekil 4a ile 4b kayıp ve 5a ile 5b doğruluk grafiklerini göstermektedir. Rastgele sonuçların deney sonuçları üzerindeki etkisini en aza indirmek için kayıp fonksiyonu ve optimizasyon yöntemlerine göre kombinasyonlar oluşturularak SSA-VGG16 ve SSA-VGG19 modelleri eğitilmiştir.

Şekil 4a'dan da görüleceği üzere, İkili çapraz entropi modeliyle oluşturulan tüm SSA modellerinde dalgalanmalar büyüktür. Dalgalanmaların bu kadar fazla olması öğrenme davranışının devirler boyunca devam ettiğini göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 4b görüldüğü gibi, Karşılaştırmalı kayıp modeliyle oluşturulan SSA modellerinde dalgalanmalar nispeten daha düşüktür.



(a)

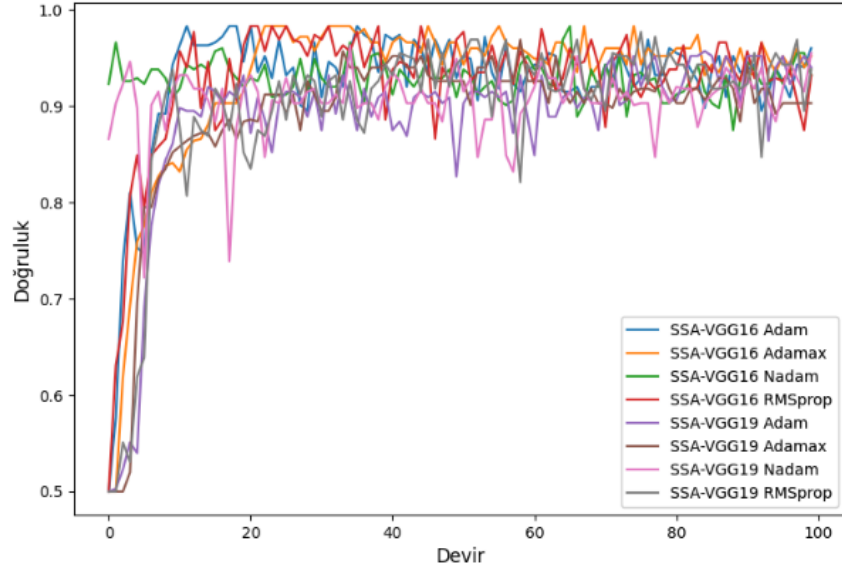


(b)

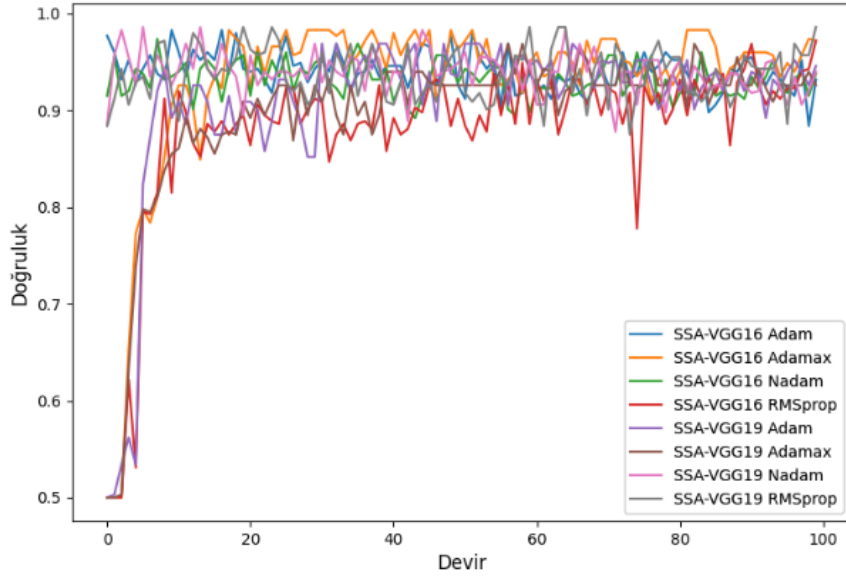
**Şekil 4.** SSA modellerinin kayıp grafikleri, (a) İkili çapraz entropi kayıp grafiği, (c) Karşılaştırmalı kayıp grafiği.

Doğruluk grafiklerine göre (Şekil 5a ve Şekil 5b), modellerin doğruluk değerleri yaklaşık olarak 20. Devire kadar hızlı bir şekilde artmıştır. Dalgalanmaların devirler boyunca devam etmesinin sebebinin eğitim ve test setlerinin ayrılması sırasındaki dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sınıflar arasında verilerin dağılım dengesinin olmaması da dalgalanmaların arttığını gösterebilir.





(a)



(b)

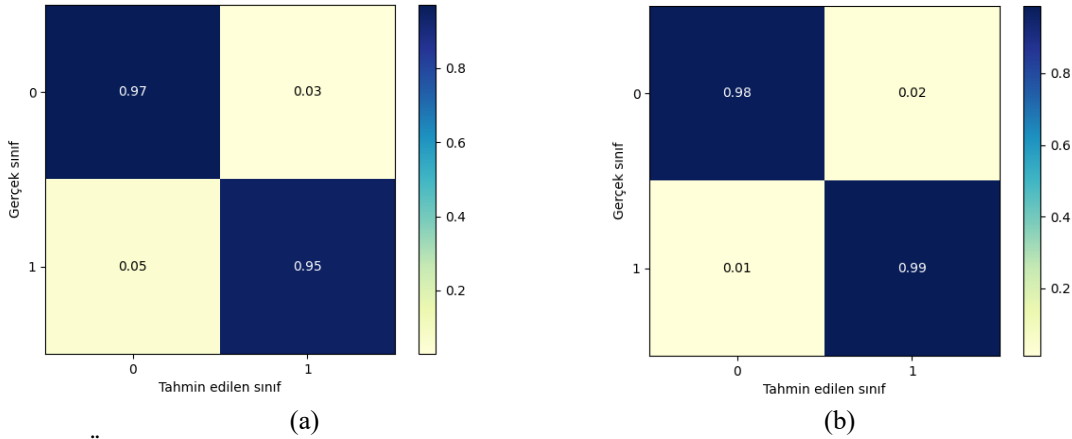
**Şekil 5.** SSA modellerinin doğruluk grafikleri, (a) İkili çapraz entropi doğruluk grafiği, (b) Karşılaştırmalı doğruluk grafiği.

VGG16 ve VGG19 modellerinin farklı optimizasyon yöntemleri ve kayıp fonksiyonlarına göre değerlendirilmesine ilişkin sınıflandırma performans sonuçları Tablo 2’de listelenmiştir. Modellerin değerlendirilmesinde benzerlik ölçütü olarak Kosinüs benzerliği kullanılmıştır. İkili çapraz entropi modeli, SSA-VGG16 ile Adam optimizasyon yöntemi ve Karşılaştırmalı kayıp modeli, SSA-VGG19 ile RMSprop yöntemi diğer modellere göre daha iyi performans sonuçları göstermiştir. SSA-VAGG16 Adam optimizasyon yönteminde doğruluk, kayıp ve MSE değerleri sırasıyla 0,906, 0,250, 0,040 ve SSA-VGG19 ve RMSprop yönteminde doğruluk, kayıp ve MSE değerleri sırasıyla 0,986, 0,056, 0,014’tür. Son olarak, İkili çapraz entropi modelinde kayıp değeri Karşılaştırmalı kayıp modeline göre daha yüksektir.

**Tablo 2.** Modellerin farklı kayıp modellerine göre sınıflandırma performans sonuçları, En iyi sonuçlar koyu yazı tipindedir.

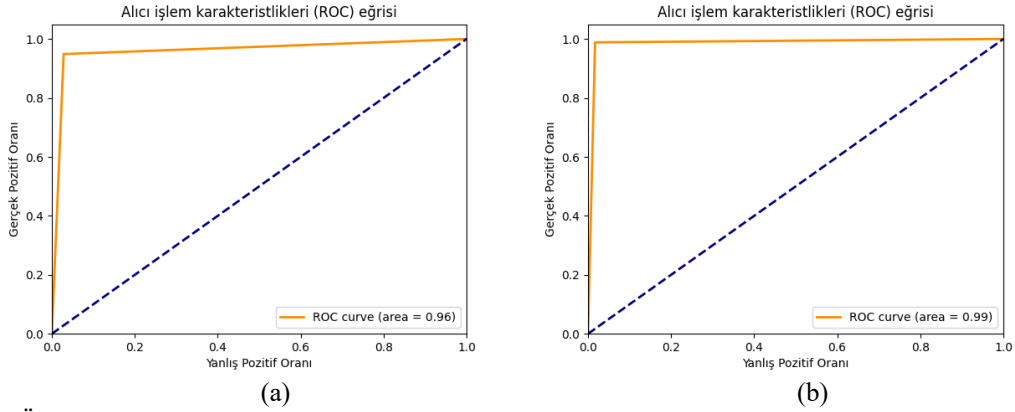
Model	Optimizasyon	İkili çapraz entropi				Karşılaştırmalı kayıp			
		Doğruluk	Kayıp	MSE	Süre (s)	Doğruluk	Kayıp	MSE	Süre (s)
SSA-VGG16	Adam	<b>0,960</b>	<b>0,250</b>	<b>0,040</b>	1644,24	0,932	0,047	0,068	1629,07
	Adamax	0,952	0,307	0,048	1712,91	0,972	0,099	0,028	1741,46
	Nadam	0,932	0,261	0,068	1555,31	0,938	0,077	0,063	1704,27
	RMSprop	0,932	0,210	0,068	1791,92	0,972	0,108	0,28	1731,60
SSA-VGG19	Adam	0,940	0,347	0,060	1912,34	0,946	0,077	0,054	1905,42
	Adamax	0,903	0,300	0,097	1956,36	0,926	0,098	0,074	1811,25
	Nadam	0,955	0,271	0,045	1940,82	0,940	0,063	0,060	1748,55
	RMSprop	0,938	0,270	0,063	1944,47	<b>0,986</b>	<b>0,056</b>	<b>0,014</b>	1935,70

Önerilen sınıflandırıcı modellerin performans ve hata durumunu belirlemek için karışıklık matrisleri kullanılmıştır. Şekil 6’da kayıp fonksiyonlara göre en yüksek doğruluk sonucu gösteren modellerin sonuçları verilmiştir. Burada, 0 etiketi toplanamaz yağ gülü sınıfını ve 1 etiketi ise toplanabilir yağ gülü sınıfını ifade etmektedir. Şekil 6a’da toplanamaz yağ gülü sınıfını 0,97 değerindeki yüksek bir oranla tahmin etmiştir. Şekil 6b’de ise toplanamaz ve toplanabilir yağ gülü sınıfları yüksek bir oranla tahmin edilmiş. Önerilen model neredeyse tüm sınıfları doğru bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir.



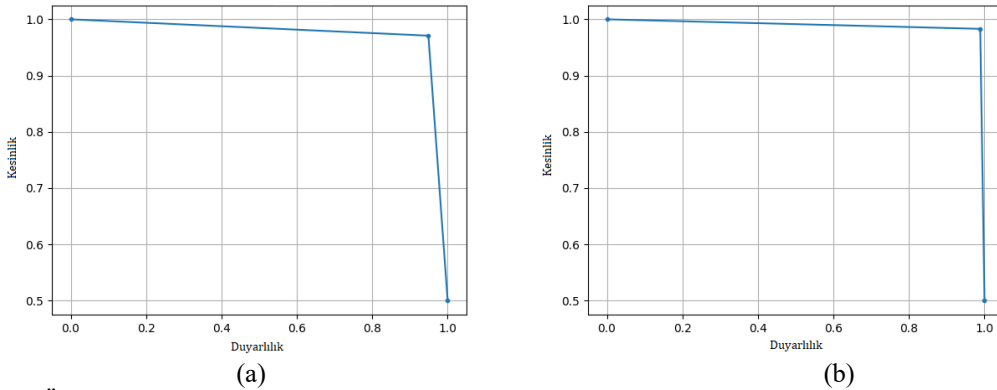
**Şekil 6.** Önerilen modellerin karışıklık matrisleri, (a) SSA-VGG16 ikili çapraz entropi modeli ve Adam optimizasyon yöntemi karışıklık matrisi, (b) SSA-VGG19 karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop optimizasyon yöntemi karışıklık matrisi.

Önerilen sınıflandırıcı modellerin genel performanslarını değerlendirmek için modellerin ROC grafikleri incelenebilir. Bu grafikte, eğri ne kadar sol üste yakında model o kadar iyi performans sunmaktadır. Diğer bir ifadeyle ROC eğrisi altında kalan alan 1 değerine ne kadar yakınsa veya yüksekse sınıfların ayrılması daha iyi olduğu söylenebilir. Kayıp değerlerine göre en yüksek doğruluk elde eden modellerin ROC eğrisi grafikleri Şekil 7’de verilmiştir. SSA-VGG16 İkili çapraz entropi ve Adam optimizasyon modelinin (Şekil 7a) elde ettiği AUC değeri 0,96 ve SSA-VGG19 Karşılaştırmalı kayıp ve RMSprop optimizasyon modelinin (Şekil 7b) elde ettiği AUC değeri 0,99’dur. Sonuç olarak, SSA-VGG19 Karşılaştırmalı kayıp ve RMSprop optimizasyon yöntemiyle oluşturulan model diğer modele göre daha iyi performans göstermektedir.



**Şekil 7.** Önerilen modellerin ROC eğrileri, (a) SSA-VGG16 ikili çapraz entropi modeli ve Adam optimizasyon yöntemi ROC eğrisi, (b) SSA-VGG19 karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop optimizasyon yöntemi ROC eğrisi

Daha önceden de belirtildiği gibi, veri setinde az sayıda görüntü bulunmaktadır. Önerilen SSA modellerinin veri setindeki az sayıda görüntüsü olan sınıflarla nasıl başa çıktığını görebilmek için ROC eğrisine ek olarak Kesinlik-Duyarlılık grafiği inceleyebiliriz. Kesinlik-Duyarlılık grafiğine göre ideal bir sınıflandırıcı hem kesinlik hem de duyarlılık değerlerinin yüksek olduğu bir noktada olacaktır. Kayıp fonksiyonuna göre yüksek doğruluk gösteren modellerin Kesinlik-Duyarlılık grafiği Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8a ve Şekil 8b’den de görüleceği üzere grafik sağ üst köşeye yakındır. Şekil 8b, SSA-VGG19, Karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop optimizasyon yöntemiyle oluşturulan model, azınlık sınıflardan (toplanamaz yağ güllü) görüntülerini uygun bir şekilde sınıflandırabildiğini göstermektedir.



**Şekil 8.** Önerilen modellerin Kesinlik-Duyarlılık grafikleri, (a) SSA-VGG16 ikili çapraz entropi modeli ve Adam optimizasyon yöntemi Kesinlik-Duyarlılık grafiği, (b) SSA-VGG19 karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop optimizasyon yöntemi Kesinlik-Duyarlılık grafiği.

### 3.2. Tartışma

DeneySEL sonuçlara göre en iyi sınıflandırma doğruluğu SSA-VGG19, Karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop optimizasyon yöntemiyle oluşturulan modelde elde edilmiştir. Bu modelin doğruluğu 0,986’dır. En düşük sınıflandırma doğruluğu ise SSA-VGG16, İkili çapraz entropi modeli ve Adamax optimizasyon yöntemindedir. Bu modelin elde ettiği sınıflandırma doğruluğu 0,903’tür. Bilindiği gibi veri sayısı ESA modellerinin performansını etkiler. Ancak deneylerden elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi önerilen SSA modelleri, eğitilecek az sayıda örnek olmasına rağmen iyi bir sınıflandırma yeteneği göstermiştir. Ayrıca eğitim süreci için seçilen parametreler modelin performans sonuçlarına olumlu katkı sağlamıştır. Tablo 3, son 5 yıldır literatürde gül çiçeğinin ESA modelleri kullanılarak sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların özeti içermektedir.

Literatürde aynı veri setini kullanan [2] aktarım öğrenmeyle oluşturdukları çalışmada en yüksek sınıflandırma doğruluğunu VGG19 modelinde elde etmişlerdir. Önerdikleri çalışmadaki sınıflandırma doğruluğu %97,96’dır.

Yağ gülü hasat durumu sınıflandırma sonuçları literatürde bulunan benzer yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve SSA-VGG19 modeli doğruluk performans ölçütüne dayanarak daha etkili sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

ESA kullanan başka bir çalışmada [12] ShuffleNet V2 mimariyle taze kesilmiş gül kalitesini %98,891 ile %99,915 arasındaki bir doğrulukla sınıflandırmışlardır. [13] kapsamlı bir veri setinde denedikleri gül türü sınıflandırma çalışmasında ESA ve MÖ birleştiren bir çalışma önermişler ve önerdikleri modelle kesinlik değerini %91,76 olarak bulduklarını belirtmişlerdir. [14] önerdikleri ESA modeliyle yaptıkları çalışmada gül türlerini %85 oranındaki doğrulukla sınıflandırmışlardır. Bu çalışmanın literatürde incelenen diğer çalışmalarla kıyaslanabilir bir sonuç üretmesi, önerilen SSA modellerinin kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.** Literatürde gül çiçeğinin sınıflandırılmasıyla ilgili çalışmalar.

Referans	Görüntü sayısı	Uygulama türü	Model	Performans metriğinin sonucu (En yüksek)
[2]	961	Yağ gülü toplanabilirliği sınıflandırma	VGG19	Doğruluk: %97,96
[12]	434	Kesme gül kalitesini sınıflandırma	ShuffleNet V2	Doğruluk: %99,915
[13]	5367	Gül türlerini sınıflandırma	ESA+RO	Kesinlik: %91,76
[14]	538	Gül türlerini sınıflandırma	ESA	Doğruluk: %85
Bu çalışma	877	Yağ gülü toplanabilirliği sınıflandırma	SSA-VGG19	Doğruluk: 0,986

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada yağ gülü bitkisinin hasat durumunun sınıflandırılması SSA yapısıyla incelenmiştir. ESA'nın bir türü olan SSA, yağ gülü hasat durumunu belirlemek için yağ gülü görüntülerinden her bir yağ gülünü benzersiz bir şekilde tanımlayan özellik vektörlerini çıkarmaktadır. Daha sonra, bu özellik vektörleri, bir mesafe ölçütü fonksiyonu kullanılarak karşılaştırılmakta ve sonuç benzerlik veya farklılık skoruna göre değerlendirilmektedir. Çalışmada, İkili çapraz entropi ve Karşılaştırmalı kayıp modelleri, Adam, Adamax, Nadam ile RMSprop optimizasyon yöntemleri ve VGG16 ve VGG19 ESA modellerinin kombinasyonları denenmiştir. Çalışmada, benzerlik ve farklılık skoru Kosinüs benzerliğine göre değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre en yüksek sınıflandırma doğruluğu 0,986'dır ve bu doğruluk değeri SSA-VGG19, Karşılaştırmalı kayıp modeli ve RMSprop ile oluşturulan modelden elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular doğrultusunda geliştirilen model, yağ gülü hasat durumunun belirlenmesinde yardımcı olabileceği göstermektedir. Deneysel sonuçlarda da görüldüğü gibi, SSA'nın görüntü sayısının az olduğu durumlarda etkili bir şekilde sınıflandırma işlemini gerçekleştirmesi bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, eğitim ve test setleri rastgele oluşturulan görüntü çiftlerine bağlı olduğundan bu durum farklı deneylerde farklı doğruluk ve kayıp değerlerini verebilir. Bu durum çalışmanın sınırlılığını oluşturmaktadır.

Çalışma, bu yaklaşımla farklı gül türlerini sınıflandırmak için genişletilebilir. Farklı gül türlerini sınıflandırmak, geliştirilen yaklaşımlara olan güveni sağlayacak ve uygulanabilirliğini artıracaktır. Ayrıca farklı ESA modellerinin çalışmaya eklenmesiyle modellerin karşılaştırılabilirliği de sağlanabilir. Gelecek çalışmalarda etiketli ve az görüntü içeren farklı veri setlerinde az çekimli öğrenme (Few-Shot learning) modelinin kullanılmasına odaklanılacaktır.

#### Kaynaklar

- [1] Timor AN. World production oil rose and rose oil. *Nature Sciences* 2011; 6 (2): 93-110.
- [2] Duman B, Kayaalp K. Yağ gülü (*Rosa damascena* Mill.) bitkisinin hasat durumunun makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri ile tespiti. *El-Cezeri* 2022; 9 (4): 1328-1341.
- [3] Eli-Chukwu NC. Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 2019; 9 (4): 4377-4383.
- [4] Abdelmigid HM, Baz M, AlZain MA, Al-Amri JF, Zaini HG, Abualnaja M, Morsi MM, Alhumaidi A. Spatiotemporal deep learning model for prediction of taif rose phenotyping. *Agron J* 2022; 12 (4): 807.
- [5] Thuseethan S, Vigneshwaran P, Charles J, Wimalasooriya C. Siamese network-based lightweight framework for tomato leaf disease recognition. *arXiv preprint* 2022; arXiv:220911214.
- [6] Malik M, Ikram A, Batoool SN, Aslam W. A performance assessment of rose plant classification using machine learning. *Intelligent Technologies and Applications: First International Conference, INTAP 2018; 23-25 October 2018; Bahawalpur, Pakistan*, pp. 745-756.
- [7] Malik M, Aslam W, Nasr EA, Aslam Z, Kadry S. A performance comparison of classification algorithms for rose plants. *Comput Intell Neurosci* 2022.
- [8] Sobolu R, Stanca L, Pusta D, Pop I, Cordea M. Image processing technique applying to detect black spot and rust diseases at roses. *Managerial Challenges of the Contemporary Society Proceedings* 2019; 12 (1): 68-73.

- [9] Sazzad S, Rajbongshi A, Shakil R, Akter B, Kaiser MS. RoseNet: Rose leave dataset for the development of an automation system to recognize the diseases of rose. *Data Brief* 2022; 44: 108497.
- [10] Bhaskar S, Kumar P, Avinash M, Harshini S. Real time farmer assistive flower harvesting agricultural robot. 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT); 2-4 April 2021, Pune, India, pp. 1-8.
- [11] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *nature*, 2015; 521 (7553): 436-444.
- [12] Fei Y, Li Z, Zhu T, Ni C. A lightweight attention-based convolutional neural networks for fresh-cut flower classification. *IEEE* 2023; 11: 17283-17293.
- [13] Saw S, Mahato A, Kumar B, Kukreja V. Rose Multiclassification: Harnessing Hybrid CNN and Random Forest Model. In 2024 International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM); 14-16 March 2024, Dehradun, India, pp. 38-41.
- [14] Mujahid F, Chowdhury PK, Zaman TB, Rahman MM, Reza MT, Nasir NA, Quader MA, Quader MA. Classification of Mixed Color Rose Types Using Convolutional Neural Network. In 2023 5th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI); 09-10 December 2023, Dhaka, Bangladesh, pp. 1-5.
- [15] Liu C-F, Padhy S, Ramachandran S, Wang VX, Efimov A, Bernal A, Shi L, Vaillant M, Ratnanather JT, Faria AV. Using deep Siamese neural networks for detection of brain asymmetries associated with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Magn Reson Imaging* 2019; 64: 190-199.
- [16] Bromley J, Guyon I, LeCun Y, Säckinger E, Shah R. Signature verification using a siamese time delay neural network. *Adv Neural Inf Process Syst* 1993; Denver, Colorado, USA, pp. 737-744.
- [17] Shalaby M, Belal NA, Omar Y. Data clustering improves siamese neural networks classification of Parkinson's disease. *Complexity* 2021; 2021: 1-9.
- [18] Yaşar İD, Çakır H, Coşkun A. Siyam sinir ağları ve yerel ikili örüntü kullanılarak temassız avuç içi doğrulaması. *J Polytech* 2023; 26 (4): 1475-1483.
- [19] Arısoy MV. Signature verification using siamese neural network one-shot learning. *International Journal of Engineering and Innovative Research* 2021; 3 (3): 248-260.
- [20] Toğaçar M, Cömert Z, Ergen B. Siyam sinir ağlarını kullanarak Türk işaret dilindeki rakamların tanımlanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2021; 23 (68): 349-356.
- [21] Koch G, Zemel R, Salakhutdinov R. Siamese neural networks for one-shot image recognition. *ICML deep learning workshop* 2015.
- [22] Güçlü E, Aaydın İ, Akın E. DCGAN ve Siyam Sinir Ağını Kullanarak Demiryolu Bağlantı Elemanlarındaki Kusurların Tespiti. *Demiryolu Mühendisliği* 2022; (15): 46-59.
- [23] Madhu G, Bharadwaj BL, Rohit B, Vardhan KS, Kautish S, Pradeep N. Convolutional Siamese networks for one-shot malaria parasite recognition in microscopic images. In: *Demystifying Big Data, Machine Learning, and Deep Learning for Healthcare Analytics* Eds, Elsevier, 2021, pp. 277-306.
- [24] Alakuş TB. Prediction of Monkeypox on the Skin Lesion with the Siamese Deep Learning Model. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 2023; 11 (3): 225-231.
- [25] Öztürk Ş. Hash code generation using deep feature selection guided siamese network for content-based medical image retrieval. *Gazi U J Sci* 2021; 34 (3): 733-746.
- [26] Lu Y. Research on Small Sample Apple Defect Classification Method Based on Siamese Network. 2023 4th International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL); 12-14 May 2023, Zhuhai, China, pp. 489-493.
- [27] Duman B. 2022. Erişim Tarihi: 02.02.2024 IspartaGulu(RosadamascenaMill.)\_Dataset. <https://www.kaggle.com/datasets/1684654f84496eabe23b1728faab7cb9f687086d290f853978658746b65e65e8>.
- [28] Liu C, Miyauchi H, Hayashi K. DeepSniffer: A meta-learning-based chemiresistive odor sensor for recognition and classification of aroma oils. *Sens Actuators B* 2022; 351: 130960.
- [29] Lakshmi TS, Govindarajan M, Srinivasulu A. Embedding and Siamese deep neural network-based malware detection in Internet of Things. *Int J Pervasive Computing Commun* 2022.
- [30] Meddad M, Moujahdi C, Mikram M, Rziza M. Convolutional siamese neural network for few-shot multi-view face identification. *SIViP* 2023; 17 (6): 3135-3144.
- [31] Lachgar M, Hrimech H, Kartit A. Transfer learning for plants' disease classification with siamese networks in low data regime. *International Journal of Computer Engineering and Data Science (IJCEDS)* 2021; 1 (1): 8-13.
- [32] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: *Proc IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit* 2016; 27-30 June 2016, Las Vegas, NV, USA, pp. 770-778.
- [33] Alirezazadeh P, Schirrmann M, Stolzenburg F. Improving deep learning-based plant disease classification with attention mechanism. *Gesunde Pflanz* 2023; 75 (1): 49-59.
- [34] Vasconcellos ME, Ferreira BG, Leandro JS, Neto BF, Cordeiro FR, Cestari IA, Gutierrez MA, Sobrinho A, Cordeiro TD. Siamese convolutional neural network for heartbeat classification using limited 12-lead ECG datasets. *IEEE* 2023; 11: 5365-5376.

## Comparative Analysis of Machine and Deep Learning Methods in Estimating the Turkish Electricity Market Clearing Price

Ahmed İhsan ŞİMŞEK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İşletme, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> aisimsek@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 26/04/2024;

Kabul/Accepted: 13/07/2024)

**Abstract:** The estimation of the clearing price in the electricity market holds significant strategic importance within the energy sector. Energy firms can enhance their operational efficiency by providing clients with more dependable price alternatives through precise estimation of the market clearing price. The precise determination of the market clearing price holds significant significance in facilitating strategic decision-making for decision makers and investors operating within the energy sector. Accurate pricing projections are crucial for ensuring stability in the energy market and enhancing energy reliability for consumers. Hence, it is imperative to employ novel methodologies and enhance the precision of predictions within the energy sector in order to ascertain precise price estimates. This study utilized hourly power data derived from various sources such as natural gas, dam, lignite, imported coal, wind, solar, geothermal, and biomass. Additionally, hourly electricity demand data was employed as input variables to estimate the clearing price of the electricity market. The study encompasses a total of 8772 hours of data collected between April 17, 2023, to April 16, 2023. The study employed linear regression, XGBoost, Random Forest, LSTM, and SVR techniques for prediction. The models were evaluated by comparing their performances using statistical coefficients such as RMSE, MSE, MAE, and R2. Based on the acquired performance measures, it was noted that the XGBoost approach exhibited the highest level of prediction performance.

**Key words:** Electricity clearing price, machine learning, deep learning, decision support, energy.

### Türkiye Elektrik Piyasası Takas Fiyatının Tahmininde Makine ve Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

**Öz:** Elektrik piyasa takas fiyatının tahmini enerji alanında stratejik öneme sahiptir. Doğru bir şekilde piyasa takas fiyatının tahmin edilmesi ile enerji şirketleri müşterilerine daha güvenilir fiyat alternatifleri sunarak operasyonel verimliliğini artırmaktadır. Piyasa takas fiyatının doğru bir şekilde tahmini enerji sektöründeki karar vericilerin ve yatırımcıların stratejik seçimler yapmalarına yardımcı olması açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji piyasasında istikrarın sağlanması ve tüketiciler açısından enerji güvenilirliğini artırmak için fiyat tahminlerinin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle enerji endüstrisinde doğru fiyat tahminlerinin yapılması için yeni yöntemlerin kullanılması ve daha doğru tahminlerin yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada elektrik piyasa takas fiyatının tahmin edilmesi için Doğalgaz, baraj, linyit, ithal kömür, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biokütleden üretilen saatlik elektrik verileri ile saatlik elektrik talep verileri girdi değişkeni olarak kullanılmıştır. Çalışma 17.04.2023-16.04.2024 arasındaki 8772 saatlik veriyi kapsamaktadır. Çalışmada XGBoost, Random Forest, LSTM ve SVR yöntemlerinin yanı sıra doğrusal regresyon ile de tahmin yapılmıştır. Modellerin performansları RMSE, MSE, MAE ve R2 istatistik katsayıları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen performans metriklerine göre en iyi tahmin performansının XGBoost yöntemi tarafından üretildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Piyasa takas fiyatı, makine öğrenmesi, derin öğrenme, karar destek, enerji.

#### 1. Introduction

Turkey relies heavily on foreign countries to supply its energy requirements. Currently, energy emerges as a significant expenditure. Electrical energy is a fast-growing global requirement that requires high-quality, efficient, and rapid delivery. One of the primary challenges lies in the inability to store the energy derived from various sources such as oil, coal, hydropower, natural gas, nuclear, and renewable energy sources (e.g., wind, solar, biofuels). The electricity demand is steadily rising due to factors such as population growth, urbanization, industrialization, and the rapid advancement of technology, which has become an essential aspect of human existence [1].

Each country possesses energy requirements, and the current natural resources may be insufficient to satisfy these requirements. Consequently, individuals may depend on alternative sources to compensate for the insufficiency of energy. The significance of demand forecasting cannot be emphasized, given the existing constraints on the storage capacity of electrical energy. The demand for energy in Turkey is seeing growth due to

\* Sorumlu yazar: [aisimsek@firat.edu.tr](mailto:aisimsek@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2900-3032

the country's burgeoning economy and expanding population. Ensuring the equilibrium between supply and demand and accurately forecasting energy consumption holds significant importance within the framework of Turkey's external reliance [2].

The anticipation of power costs holds significant strategic significance within the energy industry. The precise prediction of electricity costs enables energy businesses to provide consumers with more consistent pricing options, hence enhancing operational efficiency. Hence, the prediction of electricity prices plays a crucial role in facilitating the strategic decision-making process for decision makers and investors operating within the energy market. Forecasting electricity prices aid decision makers in the energy sector in strategic planning and enhance the operational efficiency of energy organizations. The provision of precise price projections plays a crucial role in maintaining stability within the energy market and enhancing the dependability of energy services for consumers. Hence, the significance of study and advancements in the domain of power price forecasting within the energy sector necessitates continuous progress. Various mathematical models and artificial intelligence techniques are commonly employed in the estimation of electricity prices, as evidenced by the studies of [3-13].

ARIMA, multiple regression, and artificial neural network models were employed by [13] in their research to forecast the electricity price in Turkey. The input variables employed in the study were Natural Gas Production Amount, Wind Production Amount, Hydroelectric Production Amount (River + Dam), Thermal Production Amount (Lignite + Hard Coal), and Demand Amount. The output variable assessed the Market Demand Price. The study conducted an analysis on a total of 2928 hours of data collected over the months of March, April, and May 2020. The study concluded that the artificial neural networks method yielded the most precise forecasts. Unlike the research conducted by [13], this study includes the quantities of energy generated from imported coal, solar, geothermal, and biomass sources. Additionally, the number of input variables is expanded to enhance the precision of projections. Furthermore, the study augmented the dataset by incorporating 8772 hours of data spanning from 17.04.2023 to 16.04.2024, as opposed to the original 3-month data. Furthermore, instead of employing the ARIMA time series analysis method, the linear regression method was utilized. Furthermore, machine and deep learning approaches such as XGBoost, LSTM, Random Forest, and Support Vector Regression have been utilized to predict market clearing prices. The objective of this approach is to enhance the precision of estimating the market clearing price.

## 2. Literature Review

A variety of methodologies have been employed in scholarly works to approximate power prices. Historically, there has been a notable prevalence of research employing time series analysis and diverse optimization techniques [14-18]. Recently, research utilizing deep learning and machine learning techniques has gained prominence. The research employed an LSTM-based deep learning algorithm and utilized hourly data spanning five years, from January 1, 2015 to December 31, 2019. The effectiveness of the proposed model was evaluated using statistical coefficients including MAE, RMSE, MAPE, and SMAPE. The findings derived from the research demonstrated that the predictions generated by the suggested model were accurate [19].

A study was undertaken to assess the electricity price in the European market, utilizing parameters related to energy generation, meteorological conditions, and production inertia. SVM, RFR, DNN, and CNN models were utilized to make predictions. The predictive accuracy of the models was evaluated by comparing the statistical coefficients MAE, MAPE, SMAPE, DAAE, and RMAE. The study concluded that RF and CNN models were unable to generate precise predictions for the given dataset, whereas DNN and SVR algorithms had superior predictive performance [20].

A novel LSTM-NN based model was proposed for short-term electricity load and price forecasting in the conducted investigation. The evaluation of model performance in the study undertaken for the PJM and Spain electrical market involved the utilization of MAPE, MAE, RMSE, and VAR coefficients. The investigation has demonstrated the efficacy of the proposed new model's performance [21].

A separate study was conducted to predict short-term electricity prices for the Australian, Spanish, and PJM electricity markets. This study proposes a hybrid model that combines variational mode decomposition (VMD), self-adaptive particle swarm optimization (SAPSO), SARIMA, and deep belief network. The performance of the model was evaluated by measuring the coefficients of MAE, MAPE, and RMSE. The predictive accuracy of the suggested model has been evaluated against LSSVM, WNN, ARIMA, SAA, IAA, and MAH models. It has been demonstrated that the proposed model outperforms other approaches in terms of prediction performance [22].

A novel hybrid model was developed for electricity price prediction, comprising four modules: feature preprocessing, deep learning-based point prediction, error compensation, and probabilistic prediction module. The pre-processing module employed the Isolation Forest (IF) and Lasso algorithms. The point prediction module utilized LSTM, RNN DBN, and CNN models. Lastly, the probabilistic prediction module employed Quantile Regression (QR). The study utilized PJM energy market data to measure performance indicators, specifically

employing MAPE, MAE, and RMSE coefficients. Empirical evidence has demonstrated that the suggested hybrid model has superior predictive capabilities in comparison to the outcomes achieved using LGBM, BPNN, SVR, and KNN techniques [23].

A novel hybrid algorithm utilizing Wavelet transform was developed in a separate study undertaken for the power market in the United States. The suggested WR-SAE-LSTM model has demonstrated accurate predictions in electricity price prediction for residential, commercial, and industrial sectors, with MAPE error coefficients of 0.86%, 0.47%, and 0.49% respectively. The outcomes derived from the suggested model exhibited a high degree of concordance with the predictions made by the EAI [24].

In another study in which a new hybrid model based on VMD, CNN and GRU was proposed for short-term electricity price prediction, the prediction performance of the proposed model was measured with MAPE and RMSE methods. The results obtained from the proposed model were compared with LSTM, CNN, VMD-CNN, BP and VMD-ELMAN methods. As a result of the analysis, it was revealed that the proposed hybrid model made more successful predictions than other compared methods [25].

Upon examining the literature, one may encounter research that provides estimations of power prices for Türkiye. The study employed artificial neural networks to anticipate short-term electricity prices in Turkey. The effectiveness of the models was evaluated using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) statistical coefficient. The findings of the study conducted in Istanbul province indicate that the artificial neural network model described in this research achieved accurate predictions, as evidenced by an error coefficient of 7.52%. [26].

The study employed multiple regression and artificial neural networks, utilizing data from 2019 [27]. In this study, the input factors utilized for estimating the electricity price included natural gas, hydroelectricity, terminus, and wind power output. The study's findings indicate that artificial neural networks yielded more accurate predictions, while the multiple regression model had greater success in identifying the variables.

A comparative analysis was conducted on the predictive performance of Random Forest and Support Vector Regression models, utilizing a dataset including 10.440 observations over a duration of 15 months from 2019 to 2020. 84% of the data acquired from the EPA database is assigned for training purposes, while the remaining 16% is given for testing. The models' prediction performances were evaluated using statistical coefficients such as MAE, MAPE, and RMSE. The study revealed that the Random Forest model outperformed the SVR model in terms of prediction accuracy [28].

### 3. Data&Methodology

A total of 8772 hours of data were utilized in this study, spanning from 17.04.2023 to 16.04.2024. The outcome variable utilized in this study was the Market clearing price, which represents the point of intersection between unit supply and demand. The input variables consist of hourly data that indicate the amount of electricity produced (measured in MWh) from various energy sources, such as Natural Gas, Dam, Lignite, River Water, Imported Coal, Wind, Solar, Geothermal, and Biomass. These factors also influence the market clearing price. Additionally, the variables utilized are the total electricity consumption amount (measured in MWh). Each model in the study used a dataset that was partitioned into 80% training data and 20% testing data.

The study utilized input and output variables derived from the research conducted by [13]. This study employed multiple regression analysis to examine the elements influencing the trading price of the electricity market. The objective was to identify the components that impact the price. This research incorporates additional input factors, namely imported coal, geothermal, biomass, and solar energy, in addition to the variables utilized in the [13]. Furthermore, it is worth noting that in the present study, the dataset was augmented by incorporating 8772 hours of data, as opposed to the previous study conducted by [13], which utilized 2928 hours of 3-month data. The research included six distinct methodologies. The methods under consideration for prediction include LSTM, XGBoost, SVR, RF, and Linear Regression. Various statistical indicators were employed to evaluate the efficacy of the model, encompassing RMSE, MAE, MSE, and  $R^2$ . The statistical parameters are calculated with mathematical equations represented as Equations 1, 2, 3, and 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (2)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \quad (3)$$



$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2} \quad (4)$$

The input and output variables used in the study and the methods used for analysis are given in Figure 1.



Figure 1. Input and Output Variables Used in the Study.

In the study, XGBoost, LSTM, Linear Regression, Random Forest and Support Vector Regression models were used to estimate the electricity market clearing price.

### 3.1. XGBoost Model

The XGBoost model was first introduced by Chen & Guestrin in 2016 [29]. The goal function employs normalization to decrease model complexity, mitigate overfitting, and expedite the learning process. XGBoost is a notable ensemble model that incorporates an efficient implementation of decision trees, resulting in a composite model that exhibits superior prediction performance compared to individual techniques employed in isolation [30]. The execution of the XGBoost technique is represented by equations 5-12.

$$\hat{y}_i = \Phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(y_i), f_k \in \mathcal{F} \quad (5)$$

$$\min L^{(t)}(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) = \min(\sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) + \sum_{k=1}^t \Omega(f_k)) \quad (6)$$

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda w^2 \quad (7)$$

$$\min L^{(t)} = \min \left( \sum_{i=1}^n \left[ g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t(x_i) \right] + \Omega(f_t) \right) \quad (8)$$

$$g_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (9)$$

$$h_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}^2 l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (10)$$

$$w_j^* = -\frac{\sum g_i}{\sum h_i + \lambda} \quad (11)$$

$$obj^* = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{(\sum g_i)^2}{\sum h_i + \lambda} + \gamma \cdot T \quad (12)$$

A tree ensemble model is employed to forecast the result of a dataset comprising  $n$  samples and  $m$  features. This model utilizes  $K$  additive functions, denoted as  $\mathbf{D} = \{(x_i, y_i)\} (|\mathbf{D}| = n, x_i \in \mathcal{R}^m, y_i \in \mathcal{R}$ . Equation 5 represents the space of regression trees, with  $\mathcal{F}$  indicating this space. The variable  $f_k$  represents the quantity of learners who are not performing well, while  $K$  represents the overall number of learners who are not performing well. The target function of the algorithm at time  $t$ , abbreviated as  $L^{(t)}$ , is formally defined by Equation 6. The parameter denoted as  $l(y_i, \hat{y}_i^{(t)})$  comprises a range of loss functions that are employed to address specific problems. Equation 7 introduces a commonly utilized approach for quantifying the degree of deviation between the observed value ( $y_i$ ) and the expected value ( $\hat{y}_i^{(t)}$ ), together with the overall intricacy of the model, denoted as  $\sum_{k=1}^t \Omega(f_k)$ . In the  $t$ th iteration, the objective function is evaluated by replacing the expected value ( $\hat{y}_i^{(t)}$ ) for the  $i$ th sample. Equation 8 presents the execution of the calculation using the second-order approximation of the Taylor expansion at the estimated value of  $y$  from the previous iteration, represented as  $\hat{y}_i^{(t-1)}$ . Equation 8 represents the first and second derivatives of the loss function  $l(y_i, \hat{y}_i^{(t)})$ , denoted as  $g_i$  and  $h_i$ , respectively. The derivative can be computed by substituting the formulas labeled as Equation 18, Equation 9, and Equation 10 into Equation 6, as previously described. Equations 11 and 12 can be used to derive solutions. The variable  $obj^*$ , denoted by

equations 11 and 12, represents the numerical value of the score of the loss function. A lower score indicates a tree structure that is more proximate to an ideal state. The sign  $w_j^*$  denotes the efficient solution for the weights in the scenario being examined in the XGBoost model, n\_estimators is 787, the learning rate is 0.01, max\_depth is 16, min\_child\_weight is 3, subsample is 0.53 and gamma is 0.002.

### 3.2. LSTM Model

The Long Short-Term Memory (LSTM) was initially introduced by Hochreiter and Schmidhuber [31]. This model was meticulously built and incorporated memory features derived from the Recurrent Neural Network (RNN) in order to address the issue of long-term reliance. The Long Short-Term Memory (LSTM) model effectively preserves the neural network's long-term memory, making it suitable for analyzing carbon prices. The vanishing gradient problem arises in recurrent neural networks (RNNs) due to the unrestricted updating of information at the network layer, resulting in chaotic and easily disappearing information. Nevertheless, the Long Short-Term Memory (LSTM) network incorporates a forgetting unit and a memory unit within the hidden layer. This enables the elimination of insignificant information upon the introduction of new data while preserving crucial information in long-term memory. The units in Long Short-Term Memory (LSTM) are referred to as gates, and the core components of gating mechanisms consist of a single cell and three gates, namely the input gate, output gate, and forget gate [32]. The procedure for implementing the Long Short-Term Memory (LSTM) technique is outlined in Equation 13-19 subsequently:

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (13)$$

$$f_t = \sigma_g (W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (14)$$

$$i_t = \sigma_g (W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (15)$$

$$C'_t = \sigma_c (W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (16)$$

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times C'_t \quad (17)$$

$$o_t = \sigma_g (W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (18)$$

$$h_t = o_t \times \tanh (C_t) \quad (19)$$

Normalization was performed on the data using Equation 13. The variables  $x_t$ ,  $h_{t-1}$ ,  $f_t$ , and  $\sigma_g$  are included in Equation 14, representing the input of the time series, the previous hidden state, the output vector, and the activation function, respectively. The bias coefficient is commonly referred to as  $b_f$ , whereas the forget gates are labeled as  $W_f$  and  $U_f$ . The output vector is linked to the forget gate. Equation 14 represents this relationship. The relationship between the current point in the time series input, represented as  $x_t$ , and the hidden state, represented as  $h_{t-1}$ , from the previous time frame is described by Equations 15 and 16. The values of the coefficients  $i_t$  and  $C'_t$  within this gate are determined by these variables. These coefficients are calculated using the activation function. The variables  $W_i$ ,  $U_i$ ,  $W_c$ , and  $U_c$  indicate the weight coefficients, while the symbols  $\sigma_g$  and  $\sigma_c$  represent the activation function. Equation 17 represents the update process of the cell state, denoted as  $C_t$ . This process involves multiplying the output of the input gate,  $i_t$ , with the cell candidate data,  $C'_t$ , and the result of multiplying the prior cell state,  $C_{t-1}$ , by the outcome of the forget gate,  $f_t$ . The computation yields a description of the altered cellular condition, represented as  $C_{t-1}$ . The equation represented as (18) illustrates the mechanism via which the output vector  $\sigma_t$  is produced by the transformation of the input vectors  $h_{t-1}$  and  $x_t$  using the activation function  $\sigma_g$ . The input gate is connected to the bias coefficient,  $b_o$ , as well as the weighted values of the cell state,  $W_o$  and  $U_o$ . The value of the output gate,  $o_t$ , is multiplied by the current sequential cell state,  $C_t$ , once it is generated. The activation function tanh is applied to the output of the hidden layer, as shown in Equation (19). In the LSTM model, optimizer=adam, loss= MSE, epochs=100, batch\_size=32, verbose=1.

### 3.3. Random Forest Model

In 2001, Breiman introduced the random forest model, which is an ensemble learning technique that integrates decision trees into random forests. This approach aims to enhance prediction accuracy and mitigate the issue of overfitting. The system functions by creating several decision trees during the training process and producing the mode of the categories for tasks such as classification or the mean forecast for regression analysis [33]. The random forest model is classified as an ensemble tree-based learning approach. The technique being offered is the

generation of predictions by the calculation of the average of the outcomes generated by multiple individual trees. The construction of individual trees relies on the use of bootstrap samples rather than the original dataset. Bootstrap gathering, also referred to as bagging, is a technique employed to mitigate the issue of overfitting [34].

The structure of the RF method is depicted in Figure 2.

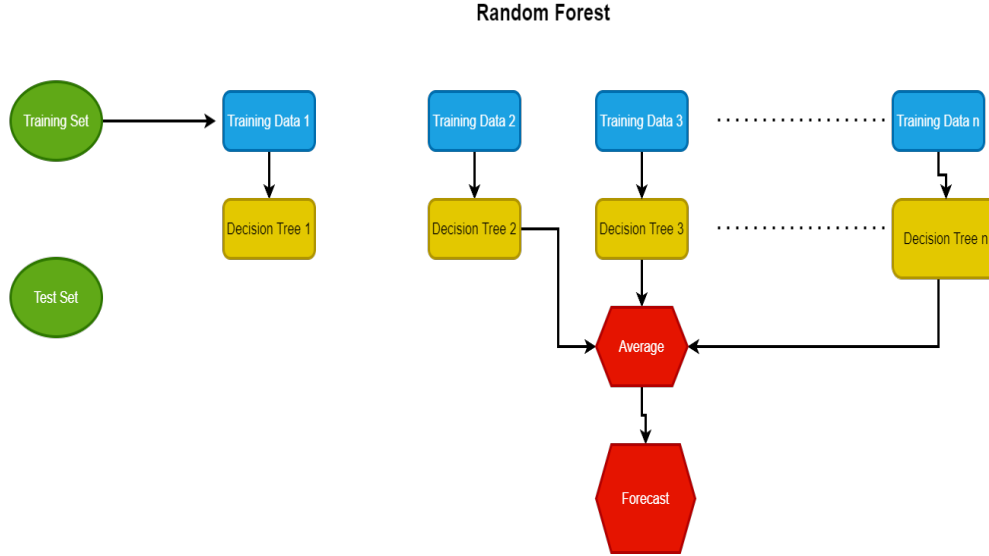


Figure 2. Random Forest Approach.

In the created Random Forest model,  $n\_estimators=150$ ,  $min\_sample\_split=2$ ,  $min\_samples\_leaf=1$ , and  $random\_state=42$  were taken as parameters. In the first stage of the Random Forest model, data is collected and divided into training and testing. After the necessary adjustments are made to the data, multiple decision trees are brought together. Afterwards, different data points are assigned to different trees by performing bootstrap sampling. A decision tree is created on each sampled dataset and decision and leaf nodes are created. Afterwards, the decision trees are combined. An assessment is conducted on the test set to evaluate the Random Forest model, and performance metrics are measured.

### 3.4. Support Vector Regression Model

The initial introduction of the support vector machine SVR technique in the 1990s is attributed to Cortes and Vapnik [35]. Subsequently, a regression methodology called support vector machine for regression was developed [36]. Support vector regression (SVR) is a highly efficient machine learning method that has been widely employed in several fields. The machine learning approach known as Support Vector Regression (SVR) employs Support Vector Machines (SVM) for the purpose of estimating functions [37].

The software application known as Support Vector Regression (SVR) is utilized to identify the optimal hyperplane that effectively segregates distinct variables. The hyperplane that is considered ideal is characterized by its possession of the maximum margin, hence ensuring a fair distance from all variables [38].

Equation 20-26 outlines the consecutive phases of the Support Vector Regression (SVR) methodology.

$$f(x) = \omega \Phi(x) + b \tag{20}$$

$$L(f(x), y, \epsilon) = f(x) = \begin{cases} 0 & |y - f(x)| \leq \epsilon \\ |y - f(x)| - \epsilon & |y - f(x)| > \epsilon \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} \text{Min. } \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \\ \text{sub. t. } \begin{cases} y_i - \omega \Phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i \\ -y_i + \omega \Phi(x_i) + b \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

$$\omega^* = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i) \tag{23}$$

$$b^* = \frac{1}{N_{nsv}} \left\{ \sum_{0 < \alpha_i < C} [y_i - \sum_{x_i \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) - \epsilon] + \sum_{0 < \alpha_i < C} [y_i - \sum_{x_j \in SV} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + \epsilon] \right\} \tag{24}$$

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x-x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{25}$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b^* \tag{26}$$

Support Vector Regression (SVR) aims to identify a linear regression function, represented as  $f(x)$ , in a high-dimensional space. Let  $x$  denote an element that is a member of the set of real numbers, and let it function as the sample vector. The mapping of the function exhibits non-linear properties. Including a linear insensitivity loss function, denoted as  $L(f(x), y, \epsilon)$ , improves the resilience of the optimization problem. Equation 22 provides a numerical representation of the loss function. Equation 22 involves the representation of the input vector and output value by the variables  $x_i$  and  $y_i$ , respectively. The variables in question are linked to a particular serial number, represented by the symbol  $i$ . Both variables  $x_i$  and  $y_i$  are members of the set of real numbers, which is represented as  $R$ . The input vector has a dimension of  $d$ . The variable  $d$  represents the cardinality of the elements contained in an input vector in this scenario.  $n$  represents the quantity of training samples. The symbol  $\epsilon$  represents the measure of precision in regression analysis. The variable  $C$  denotes a punishment factor that measures the magnitude of the penalty imposed on a data sample when its error exceeds the threshold value  $\epsilon$ . The slack variables  $\xi_i$  and  $\xi_i^*$  are employed to impose penalties on the complexity of the fitting parameters. To determine the estimation of  $a$  and  $b$ , it is crucial to tackle the optimization problem as outlined in Equations 23 and 24. The variable  $N_{nsv}$  represents the number of support vectors that have been specifically recognized. The Lagrange multipliers, denoted as  $\alpha_i$  and  $\alpha_i^*$ , are subject to the constraint of being non-negative. In this specific scenario, Equation 25 utilizes the kernel function, denoted as  $K(x_i, x_j)$ . The Gaussian kernel function, renowned for its remarkable ability to generalize, is chosen. Equation 26 represents the final regression function. The SVR model utilized a kernel function. The following values were used:  $C=1$ ,  $\epsilon=0.1$ , and  $\gamma$ : scale.

#### 4. Results&Discussion

Table 1 and Table 2 present the training and test data acquired from LSTM, XGBoost, SVR, LR, and RF models, respectively. The model performances were evaluated using the MSE, RMSE, MAE, and R2 statistical factors. A decrease in the values of MSE, RMSE, and MAE suggests that the model exhibits reduced inaccuracy in its predictions. R2 is a measure of the extent to which the independent variables in a model account for the variation in the dependent variable. A high R2 value suggests that the model yields superior outcomes.

**Table 1.** Statistical coefficients of training data.

Training	XGBoost	RF	LSTM	SVR	LR
MSE:	0.0005	0.0011	0.0135	0.0092	0.0180
RMSE:	0.0216	0.0334	0.1161	0.0958	0.1342
MAE:	0.0165	0.0247	0.0899	0.0761	0.1060
R2:	0.9899	0.9759	0.7079	0.8014	0.6103

**Table 2.** Statistical coefficients of testing data.

Training	XGBoost	RF	LSTM	SVR	LR
MSE:	0.0005	0.0011	0.0135	0.0092	0.0180
RMSE:	0.0216	0.0334	0.1161	0.0958	0.1342
MAE:	0.0165	0.0247	0.0899	0.0761	0.1060
R <sup>2</sup> :	0.9899	0.9759	0.7079	0.8014	0.6103

The power market clearing price was estimated using five distinct models based on the acquired data set. Upon examination of the data, it becomes evident that the Linear regression model yields the most unfavorable forecast outcomes. The LR model yielded a mean squared error (MSE) of 0.018, root mean squared error (RMSE) of 0.134, and mean absolute error (MAE) of 0.106. The R<sup>2</sup> value yielded the most unfavorable outcome in comparison to the other models. Following the LR model, it is observed that the LSTM model yields the most

unfavorable outcome. The study conducted by Arifoglu & Kandemir (2022) found that LSTM achieved the highest level of prediction accuracy [39]. In contrast, the findings of this study indicate that the LSTM model exhibits inferior prediction performance compared to the LR model. The support vector regression (SVR) model is ranked third in terms of the predictive outcomes it generates. The error coefficients for the SVR model were measured as 0.009 for MSE, 0.095 for RMSE, and 0.0761 for MAE. While the SVR model yielded higher statistical coefficients than the LR and LSTM models, it exhibited inferior performance in comparison to the other two models employed in the study. The investigation yielded the highest prediction performances from the RF and XGBoost models. The RF model yielded mean squared error (MSE), root means squared error (RMSE), mean absolute error (MAE), and  $R^2$ -values of 0.0011, 0.0334, 0.0247, and 0.9756, respectively. The data indicates that the RF model exhibits much superior predictive ability compared to the LR, SVR, and LSTM models. The analysis reveals that the XGBoost model exhibits the highest level of prediction performance. The XGBoost model and RF models have superior prediction performances compared to the other three approaches. When conducting a comparison between XGBoost and RF techniques, it becomes evident that the XGBoost model exhibits superior prediction performance across all assessed performance parameters. The Max Mean Squared Error (MSE) coefficient for the XGBoost model was calculated to be 0.0005. This demonstrates that it yields highly successful outcomes. Furthermore, the Mean Absolute Error (MAE) value was calculated to be 0.0165. This value indicates that it generates forecasts with a lower margin of error compared to alternative methods.

There is a prevailing observation that the predictive capabilities of Linear Regression, LSTM, and SVR models are inadequate for the given dataset. This is confirmed by the high values of MSE, MAE, and RMSE, as well as the lower  $R^2$  values in comparison to other approaches. The Random Forest and XGBoost models show strong predictive capabilities in forecasting the clearing price of the Turkish Electricity market, considering the specific dataset employed. The models have good prediction performance, as indicated by their low RMSE, MSE, and MAE values, as well as high  $R^2$  value.

The study's error coefficients exhibited a comparatively smaller magnitude when compared to the findings provided by Arslan & Ertugrul (2022), particularly in the predictions generated by ensemble methodologies like Random Forest and XGBoost. The Random Forest and XGBoost strategies, which surpass the ARIMA, Multiple Regression, and Artificial Neural Networks methods employed in the study, are anticipated to yield more precise outcomes in predicting energy market clearing prices, even when dealing with a bigger dataset. Further study initiatives may involve the utilization of diverse machine learning and deep learning methodologies to determine the trading price of the electrical market. In addition, the study can contain hybrid models, which combine many models, and then compare them with typical hybrid models. Moreover, the dataset has the capacity to be expanded and employed in other domains.

## References

- [1] Haliloğlu EY, Tutu BE. Türkiye için kısa vadeli elektrik enerjisi talep tahmini. *Yasar University EJ*; 2018; 13(51): 243-255.
- [2] Nebati EE, TAŞ M, Ertaş G. Türkiye’de elektrik tüketiminde talep tahmini: zaman serisi ve regresyon analizi ile karşılaştırma. *Eur J Sci Technol*; 2021; (31): 348-357.
- [3] Contreras J, Espínola R, Nogales F, Conejo A. Arima models to predict next-day electricity prices. *IEEE Trans Power Syst* 2003; 18(3): 1014-1020.
- [4] Amjady N, Daraeepour A, Keynia F. Day-ahead electricity price forecasting by modified relief algorithm and hybrid neural network. *IET Gener Transm Distrib*; 2010; 4(3): 432-444.
- [5] Carpio KJE, Go AML, Roncal CKM. Forecasting day-ahead electricity prices of Singapore through ARIMA and wavelet-ARIMA. *DLSU Bus Econ Rev*; 2012; 22(1): 97-118.
- [6] Voronin S, Partanen J, Kauranne T. A hybrid electricity price forecasting model for the Nordic electricity spot market. *Int Trans Electr Energy Syst*; 2013; 24(5): 736-760.
- [7] Wang Z, Liu F, Wu J, Wang J. A hybrid forecasting model based on bivariate division and a backpropagation artificial neural network optimized by chaos particle swarm optimization for day-ahead electricity price. *Abstr Appl Anal* 2014; 2014: 1-31.
- [8] Jiang P, Liu F, Song Y. A hybrid multi-step model for forecasting day-ahead electricity price based on optimization, fuzzy logic and model selection. *Energies* 2016; 9(8): 618.
- [9] Gao G, Lo K, Lu J. Risk assessment due to electricity price forecast uncertainty in UK electricity market. In: 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC); 2017; New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-6.
- [10] Pourdayaei A, Mokhlis H, Illias H, Kaboli S, Ahmad S. Short-term electricity price forecasting via hybrid backtracking search algorithm and ANFIS approach. *IEEE Access* 2019; 7: 77674-77691.
- [11] Huang C, Shen Y, Chen Y, Chen H. A novel hybrid deep neural network model for short-term electricity price forecasting. *Int J Energy Res*; 2020; 45(2): 2511-2532.

- [12] Karatekin C, Başaran T. Forecasting the day ahead electricity energy price by using data analysis methods. *Iğdır Univ J Inst Sci Technol*; 2022; 12(4): 2075-2084.
- [13] Arslan B, Ertuğrul İ. Çoklu regresyon, ARIMA ve yapay sinir ağı yöntemleri ile Türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *J Manag Econ Res*; 2022; 20(1): 331-353.
- [14] Misiorek A, Trueck S, Weron R. Point and interval forecasting of spot electricity prices: linear vs. non-linear time series models. *Stud Nonlinear Dyn Econom*; 2006; 10(3).
- [15] Wang R, Fu-xiong W, Ji W. Particle swarm optimization based GM(1,2) method on day-ahead electricity price forecasting with predicted error improvement. In: *2nd International Workshop on Database Technology and Applications*; 2010; Wuhan, China. pp. 1-6.
- [16] Martínez-Álvarez F, Troncoso A, Riquelme J, Aguilar-Ruiz J. Energy time series forecasting based on pattern sequence similarity. *IEEE Trans Knowl Data Eng* 2011; 23(8): 1230-1243.
- [17] Ozozen A, Kayakutlu G, Ketterer M, Kayalica O. A combined seasonal ARIMA and ANN model for improved results in electricity spot price forecasting: case study in Turkey. In: *Proceedings of Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*; 2016; Portland, OR, USA. pp. 2681-2690.
- [18] Costa e Silva E., Borges A., Teodoro MF., Andrade MA., Covas R. Time series data mining for energy prices forecasting: an application to real data. In: *16th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2016)*; 2016; Porto, Portugal: Springer International Publishing. pp. 649-658.
- [19] Li W, Becker DM. Day-ahead electricity price prediction applying hybrid models of LSTM-based deep learning methods and feature selection algorithms under consideration of market coupling. *Energy* 2021; 237: 121543.
- [20] Tschora L, Pierre E, Plantevit M, Robardet C. Electricity price forecasting on the day-ahead market using machine learning. *Appl Energy* 2022; 313: 118752.
- [21] Memarzadeh G, Keynia F. Short-term electricity load and price forecasting by a new optimal LSTM-NN based prediction algorithm. *Electr Power Syst Res*; 2021; 192: 106995.
- [22] Zhang J, Tan Z, Wei Y. An adaptive hybrid model for short term electricity price forecasting. *Appl Energy* 2020; 258: 114087.
- [23] Zhang R, Li G, Ma Z. A deep learning based hybrid framework for day-ahead electricity price forecasting. *IEEE Access* 2020; 8: 143423-143436.
- [24] Qiao W, Yang Z. Forecast the electricity price of US using a wavelet transform-based hybrid model. *Energy*; 2020; 193: 116704.
- [25] Huang CJ, Shen Y, Chen YH, Chen HC. A novel hybrid deep neural network model for short-term electricity price forecasting. *Int J Energy Res*; 2021; 45(2): 2511-2532.
- [26] Var H, Türkay BE. Yapay sinir ağları kullanılarak kısa dönem elektrik yükü tahmini short term electric load forecasting using artificial neural networks. In: *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*; 2014; Bursa, Türkiye. pp. 34-37.
- [27] Kalfa VR, Arslan B, Ertuğrul İ. Determining the factors affecting the market clearing price by using multiple linear regression method. *Alphanumeric J*; 2021; 9(1): 35-48.
- [28] Demirezen S, Çetin M. Rassal Orman Regresyonu ve Destek Vektör Regresyonu ile Piyasa Takas Fiyatının Tahmini. *J. Quant Sci*; 2021; 3(1): 1-15.
- [29] Chen T, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*; 2016; New York, NY, USA. pp. 785-794.
- [30] Jabeur SB, Mefteh-Wali S, Viviani JL. Forecasting gold price with the XGBoost algorithm and SHAP interaction values. *Ann Oper Res*; 2024; 334(1): 679-699.
- [31] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Comput* 1997; 9(8): 1735-1780.
- [32] Zhou F, Huang Z, Zhang C. Carbon price forecasting based on CEEMDAN and LSTM. *Appl Energy* 2022; 311: 118601.
- [33] Chen W, Li Y, Xue W, Shahabi H, Li S, Hong H, Wang X, Bian H, Zuang S, Pradhan BB, Ahmad BB. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Sci Total Environ*; 2020; 701: 134979.
- [34] Schonlau M, Zou RY. The random forest algorithm for statistical learning. *Stata J*; 2020; 20(1): 3-29.
- [35] Cortes C, Vapnik V. Support vector networks. *Mach Learn*; 1995; 20: 273-297.
- [36] Vapnik VN. An overview of statistical learning theory. *IEEE Trans. Neural Netw.*; 1999; 10(5): 988-999.
- [37] Smola AJ, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression. *Stat Comput*; 2004; 14: 199-222.
- [38] Zouzou Y, Citakoglu H. Reference evapotranspiration prediction from limited climatic variables using support vector machines and Gaussian processes. *Eur J Sci Technol*; 2021; 28: 346-351.
- [39] Arifoğlu A, Kandemir T. Electricity price forecasting in Turkish day-ahead market via deep learning techniques. *Mehmet Akif Ersoy Univ J Econ Admin Sci*; 2022; 9(2): 1433-1458.



## Farklı Kimyasal ve Isıl Özelliklere Sahip Kömürlerin Doğrusal Programlama ile Harmanlama Optimizasyonu

Sema Nur TURAN<sup>1\*</sup>, Deniz ADIGÜZEL<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

<sup>1\*</sup> [smnrtrn@gmail.com](mailto:smnrtrn@gmail.com), <sup>2</sup> [deniza@iuc.edu.tr](mailto:deniza@iuc.edu.tr)

(Geliş/Received: 06/05/2024;

Kabul/Accepted: 25/08/2024)

**Öz:** Termik santraller elektrik üretiminde önemli bir yere sahip olan tesislerdir. Fakat üretim maliyeti, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve ürün kalitesinin sağlanması termik santraller için büyük bir problemdir. Bu problemin çözülmesi için enerji tüketimi optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, maliyetin minimize edildiği ve termik santralde kullanılması uygun sınır değerlerin kısıtı olarak kullanıldığı doğrusal programlama modeli ile dört farklı bölgeden üretilen (Orhaneli havzası, Keles Havzası, Seyitömer Havzası ve Tunçbilek Havzası) kömür, 2'li, 3'lü ve 4'lü olarak harmanlanmış ve karışım modelleri oluşturulmuştur. Buna göre toplam 6 harman grubu oluşturulmuş ve kurulan modeller Lingo programıyla çözülmüştür. Buna göre; 1. grupta Orhaneli ocağından %37,2 - Keles ocağından %62,8, 2. grupta Orhaneli ocağından %15,6 - Seyitömer ocağından %84,4, 3. grupta Keles ocağından %88,9 - Tunçbilek ocağından %11,1, 4. grupta Tunçbilek ocağından %75 - Seyitömer ocağından %25, 5. grupta Orhaneli ocağından %43 - Keles ocağından %52 ve Tunçbilek ocağından %5 ve 6. grupta ise Orhaneli ocağından %29, Seyitömer ocağından %64 ve Tunçbilek ocağından %7 oranında kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece farklı kimyasal ve ısıl özelliklere sahip kömürler harmanlama optimizasyonu ile belirli oranlarda termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre; toplam 6 harman grubu içerisinde maliyetler açısından Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3'lü harmanı ve Orhaneli / Keles 2'li harmanlarının en düşük değerleri verdiği görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Doğrusal Programlama, Harmanlama Optimizasyonu, Maliyet Minimizasyonu.

### Blending Optimization of Coals with Different Chemical and Thermal Properties with Linear Programming

**Abstract:** Thermal power plants are facilities that have an important place in electricity production. However, production costs, sustainable use of resources, and ensuring product quality are major problems for thermal power plants. Energy consumption optimizations are needed to solve this problem. In this study, coal produced from four different regions (Orhaneli Basin, Keles Basin, Seyitömer Basin, and Tunçbilek Basin) was used as a constraint with the linear programming model where the cost was minimized and the limit values suitable for use in the thermal power plant were used, in double, triple and quadruple coal. were blended and mixture models were created. Accordingly, a total of 6 blend groups were created and the established models were solved with the Lingo program. According to this; 37.2% from Orhaneli quarry in the 1<sup>st</sup> group - 62.8% from the Keles quarry, 15.6% from the Orhaneli quarry in the 2<sup>nd</sup> group - 84.4% from the Seyitömer quarry, 88.9% from the Keles quarry in the 3<sup>rd</sup> group - 11.1% from the Tunçbilek quarry, in the 4<sup>th</sup> group, 75% from Tunçbilek quarry - 25% from Seyitömer quarry, in the 5<sup>th</sup> group, 43% from Orhaneli quarry - 52% from Keles quarry and 5% from Tunçbilek quarry, and in the 6<sup>th</sup> group, 29% from Orhaneli quarry, 64% from Seyitömer quarry and 7% from Tunçbilek quarry. It was concluded that it should be used in proportion. Thus, coals with different chemical and thermal properties have been made available in thermal power plants in certain proportions through blending optimization. According to the calculations made, it is seen that among the total six blend groups, Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3-bleed blend and Orhaneli / Keles 2-bleed blends give the lowest values in terms of costs.

**Keywords:** Linear Programming, Blending Optimization, Cost Minimization.

### 1. Giriş

Kömür, bitki kalıntılarının fiziksel ve kimyasal değişimleri sonucu çökelme havuzlarında oluşur. Bu süreçler, bitki kalıntılarının çürümesi, gömülmesi, sıkıştırılması ve sonunda organik kaya olan kömüre dönüşmesini içerir. Kömür, yanabilir bir sedimenter kaya türüdür ve organik ile inorganik bileşenlerin karışımından oluşur. Organik olarak, karbon, hidrojen ve oksijen temel bileşenlerdir, ancak değişen oranlarda kükürt ve azot da içerir. İnorganik olarak, kömür, farklı kül oluşturan bileşiklerin çeşitli konsantrasyonlarda bulunduğu bir karışımdır [1].

Yanma sırasında yüksek kükürt ve kül içeriği üreten kömürlerin kullanılması, enerji santralleri, endüstriler ve evlerde çevre ve hava kirliliği üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğinden, mümkün olan en düşük kükürt ve kül içeriğine sahip kömürler tercih edilir. Bu tür kömürlerin kullanılmasından önce, kömürün kalitesinin karakterize edilmesi önemlidir, böylece kükürt içeriğinden kaynaklanan olumsuz etkilere engel olunabilir [2].

\* Sorumlu yazar: [smnrtrn@gmail.com](mailto:smnrtrn@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0009-0005-4726-7807, <sup>2</sup>0000-0002-1611-1296.



Kömürün kalitesinin karakterize edilmesi için ise kömür analizindeki temel parametreler dikkate alınır. Bu parametreler arasında kömürün nem içeriği, kül oranı, kükürt yüzdesi, sabit karbon seviyesi ve uçucu madde miktarı bulunur [3]. Nem, kömür partikülleri arasındaki boşluklarda ve yüzeylerde tutunur. Nem, kömürün ısıl değerini azaltan bir etkidir, bu nedenle, kömürün kalorifik değerini seyrelten bir faktördür [4]. Kül, yanmayan mineral bileşenlerinin oranını temsil eder. Kömürdeki kül oranı %5 ile %30 arasında değişir ve kül, diğer kirleticilerin yanı sıra toprak, taş ve mineraller gibi yabancı maddeleri içerir. Kül içeriğini azaltma çabaları, kirleticileri azaltmanın yanı sıra kömürün kalorifik değerini artırmayı amaçlar, böylece yüksek kaliteli kömüre daha yakın bir değer sunulabilir [3]. Kömürdeki kükürt içeriği ise oldukça değişkenlik göstermekle birlikte genellikle %0,5 ile %5 arasında değişmektedir. Kömürde bulunan kükürdün başlıca formları piritik, organik ve sülfat kükürttür. Piritik ve organik kükürt, kömürdeki kükürdün %50'sinden fazlasını oluşturur. Ayrıca, hava koşullarına maruz kalan kömürlerde az miktarda sülfat bulunabilir [5,6]. Uçucu madde miktarı kömürün, oksijensiz ortamda ısıtılması sırasında gaz ve sıvı ürünler haline dönüşen bileşenlerin toplamını ifade eder. Kömürün yanma sürecinde bu uçucu maddeler serbest kalır. Sabit karbon da uçucu maddeler uçurulduktan sonra, kömürdeki nem ve kül içeriğinin çıkarılması sonucunda geriye kalan bileşeni ifade eder ve yanma süreci sonrasında geriye kalan ve yakılabilir kalıntıyı temsil eder [7].

Kömür, Türkiye'nin en önemli doğal kaynaklarından biridir. Özellikle petrol üretimimiz bu kadar düşükken ve doğal gaz üretiminin temelleri daha yeni atılırken kömür üretimi zaruri bir ihtiyaçtır [8]. Ülkemizde üretilen kömürlerin evlerde yakıt olarak kullanılması için işletmelerin İl Çevre ve Orman Müdürlüğü'nden uygunluk belgesi alması gerekmektedir. Torbalama değerlerine uygun olmayan yani uygunluk belgesi alınamayan kömür, termik santrallerin istediği analiz değerlerine uygun olduğu takdirde santralde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu problemin çözülmesi için harmanlama optimizasyonu yapılmaktadır.

Harmanlama yapılırken çeşitli endüstrilerde sıkça problemlerle karşılaşılabilir ve doğrusal programlama, bu problemlerin bazılarını etkili bir şekilde çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Gıda, madencilik ve bilgisayar endüstrileri gibi farklı sektörlerde hammadde maliyetlerini minimize etmek amacıyla doğrusal programlamaya dayalı modeller geliştirilmiş fakat doğrusal programlama ile çözülemeyen problemler için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılabilir [9]. Kömür harmanlaması için yapılan çalışmalarda ise; Yuan ve ark. kok kalitesini tahmin etmek için Gauss fonksiyonlarına dayalı bir modelleme ve optimizasyon yöntemi önermiştir ve Xi-Jin ve ark. yaptıkları çalışmada kömür endüstrisindeki harmanlama problemlerini genetik algoritmalar kullanarak çözmüştür [10, 11]. Yin ve ark. tarafından kömür harmanlama optimizasyonunda, doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle çalışılmıştır ve doğrusal programlamaya göre yapay sinir ağlarıyla yapılan çözüm daha uygun sonuçlar vermiştir [12] Elevli ve ark. çalışmalarında, Garp Linyitleri İşletmesi'nde altı farklı noktada üretilen kömürün dört farklı tüketim merkezine dağıtımını planlamak amacıyla Doğrusal Programlama tekniğini kullanmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, dağıtım sistemi detaylı bir şekilde modellenmiş ve modelin çözümü için simpleks yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen model sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilerek, işletmenin çeşitli birimlerinde üretilen farklı özelliklere sahip kömürlerin maksimum faydayı sağlayacak şekilde hangi tüketim merkezlerine gönderilmesi gerektiği belirlenmiştir [13].

Bu çalışma ile kömür santrallerine beslenen malzemedeki en önemli sorunlardan biri olan malzeme kalitesinin devamlı olarak değişmesi problemi ele alınmış ve bu doğrultuda bir çözüm yöntemi ortaya konulmuştur. Bu malzemelerdeki kalite değişimlerini en aza indirmek için harmanlama yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla problem bir harmanlama optimizasyon problemidir. Bu aynı zamanda sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretiminde vazgeçilmez bir unsurdur. En uygun harmanlama modelinin oluşturulması sadece malzeme kalitesi ve maliyet açısından etkili olmayıp, bunun bir sonucu olarak da optimum bir üretim planlaması beraberinde getirerek en az çevresel etki ile bir üretimin sağlanması gerçekleştirilebilecektir. Tüm bu verilerin ışığında seçimli üretimi gerçekleştirmek ve bununla birlikte kaynakların verimli kullanımı da mümkün olabilecektir. Bu çalışmanın amacı kömür analizleri torbalamaya uygun olmayan linyitleri, harmanlama optimizasyonu ile termik santrallerin yakıt teknolojisi ve çalışma değerlerine uygun hale getirmektir. Bu çalışmada, dört farklı kömür ocağından üretilen linyit kömürü, uygun kalitede tek bir termik santrale beslenmesi için doğrusal programlama kullanılarak harmanlanmıştır. Amaç fonksiyonu toplam maliyetleri ve dolayısıyla enerji tüketimini en aza indirecek şekilde belirlenmiştir. Kömür için literatür ve standartları karşılayan ve termik santralde kullanılmasında uygun sınırlar ise modelde kısıtlar olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak farklı kimyasal ve ısı özelliklere sahip kömürler, kurulan modeller Lingo programıyla harmanlama optimizasyonu yapılarak termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Çalışma sahaları

Çalışma kapsamında 4 farklı bölgeden (Orhaneli havzası, Keles Havzası, Seyitömer Havzası ve Tunçbilek Havzası) elde edilen ve kimyasal ve ısıl özellikleri farklı kömürler kullanılmıştır. Şekil 1’de bu bölgelerin konumları verilmiştir. Tablo 1’de ise çalışma konusu linyit sahalarına ait formasyon ve kömür analiz değerleri verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Sahaları.

Tablo 1. Çalışma konusu linyit sahalarına ait formasyon ve kömür analiz değerleri [14-17].

Kod	Bölge	İl	Formasyon	Kalorifik Değer (Kcal/Kg)	Kükürt (%)	Kül (%)	Nem (%)
B2	Orhaneli Havzası	Bursa	Bu havzanın temel kayaları ofiyolitler, metamorfik şistler ve mermerlerdir.	3848-4174	2,27	8	26
B1	Keles Havzası	Bursa	Havzada temel kayalar metamorfik şistler ve kristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır.	2357-2702	1,84	20	38
K2	Seyitömer Havzası	Kütahya	Bu havzanın temel kayaları serpantinleşmiş ultrabazik kayalar ile radyolarit ve bazı yerlerde kristalize kireçtaşı içeren, ofiyolitik serilerdir.	2022-2345	1,95	25	36
K1	Tunçbilek Havzası	Kütahya	Bölge Neojen döneminde gelişmiştir. Neojen istifleri içerisinde gelişen bu volkanizma materyalleri volkanotortullar, lav ve domlar şeklindedir.	3744-4014	1,33	20	20

Çalışma kapsamında Bursa Orhaneli’de bulunan Termik santral değerlendirilmiş ve bu santrale uygun kömür özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 3’de ise harmanlama yapılacak linyit sahalarının söz konusu termik santrale olan mesafeleri verilmiştir.

**Tablo 2.** Termik Santralde Kullanılan Kömürlere Ait Analizler [18].

Santral	Ünite Gücü (MW)	Kömür Tüketimi (t/h)	Kömür Özelliği			
			Alt Isıl Değer (Kcal/Kg)	Kül (%)	Nem (%)	Kükürt (%)
Orhaneli	1x210	1x200	2560	24	32-36	2

**Tablo 3.** Linyit sahalarının termik santrale olan mesafeleri.

Termik Santral	Kömür Ocakları	Mesafe (km)
Orhaneli	Bursa-Orhaneli	16
	Bursa-Keles	54
	Kütahya-Seyitömer	138
	Kütahya-Tunçbilek	88

## 2.2. Yöntem

Doğrusal Programlama (DP), optimizasyon problemlerini çözmek için vazgeçilmez bir araçtır. Bu teknik, belirli kısıtlamalara tabi olan doğrusal modelleri değerlendirmek için matematiksel bir süreçtir ve bu durumda, üretimin optimum sonuçlarını bulmak için kullanılır [9,19]. Çalışma kapsamında tanımlanan kömür harmanlama problemi doğrusal programlama modeliyle formüle edilmiştir. Modelde; Tablo 1’de verilen kömür özellikleri teknolojik katsayılar olarak, Tablo 2’de verilen termik santral beslenen kömür değerleri kısıtlar olarak ve Tablo 3’de verilen mesafe değerleri ise amaç fonksiyonunun bileşeni olarak tanımlanmıştır. Problem maliyet minimizasyonu problemidir ve mesafe değerleri maliyetlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Buna göre; 2’li, 3’lü ve 4’lü harman modelleri oluşturulmuştur. En uygun maliyet ve kömür özelliklerinin belirlenebilmesi ve bulunan harman oranlarının ocak rezervleri gibi kısıtlamalardan etkilenmeyerek uygulanabilirliğinin artırılması amacıyla üçlü ve dördü harman modelleri de çalışma kapsamında oluşturulmuştur.

İkili harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli;

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ij} * M_i) + (A_{ji} * M_j); \quad (1)$$

$$(A_{ij} * K_i) + (A_{ji} * K_j) \geq 2560; \quad (2)$$

$$(A_{ij} * S_i) + (A_{ji} * S_j) \leq 2; \quad (3)$$

$$(A_{ij} * W_i) + (A_{ji} * W_j) \leq 36; \quad (4)$$

$$(A_{ij} * W_i) + (A_{ji} * W_j) \geq 32; \quad (5)$$

$$(A_{ij} * KU_i) + (A_{ji} * KU_j) \leq 24; \quad (6)$$

$$A_{ij} \geq 0; \quad (7)$$

$$A_{ij} + A_{ji} = 1; \quad (8)$$

$$i \neq j; \quad (9)$$

Üçlü harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli;

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ijk} * M_i) + (A_{jik} * M_j) + (A_{kij} * M_k); \quad (10)$$

$$(A_{ijk} * K_i) + (A_{jik} * K_j) + (A_{kij} * K_k) \geq 2560; \quad (11)$$

$$(A_{ijk} * S_i) + (A_{jik} * S_j) + (A_{kij} * S_k) \leq 2; \quad (12)$$

$$(A_{ijk} * W_i) + (A_{jik} * W_j) + (A_{kij} * W_k) \leq 36; \quad (13)$$

$$(A_{ijk} * W_i) + (A_{jik} * W_j) + (A_{kij} * W_k) \geq 32; \quad (14)$$

$$(A_{ijk} * KU_i) + (A_{jik} * KU_j) + (A_{kij} * KU_k) \leq 24; \quad (15)$$

$$A_{ijk} \geq 0; \quad (16)$$

$$A_{ijk} + A_{jik} + A_{kij} = 1; \quad (17)$$

$$i \neq j \neq k; \quad (18)$$

Dörtlü harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ijkl} * M_i) + (A_{jikl} * M_j) + (A_{kijl} * M_k) + (A_{lkij} * M_l); \quad (19)$$

$$(A_{ijkl} * K_i) + (A_{jikl} * K_j) + (A_{kijl} * K_k) + (A_{lkij} * K_l) \geq 2560; \quad (20)$$

$$(A_{ijkl} * S_i) + (A_{jikl} * S_j) + (A_{kijl} * S_k) + (A_{lkij} * S_l) \leq 2; \quad (21)$$

$$(A_{ijkl} * W_i) + (A_{jikl} * W_j) + (A_{kijl} * W_k) + (A_{lkij} * W_l) \leq 36; \quad (22)$$

$$(A_{ijkl} * W_i) + (A_{jikl} * W_j) + (A_{kijl} * W_k) + (A_{lkij} * W_l) \geq 32; \quad (23)$$

$$(A_{ijkl} * KU_i) + (A_{jikl} * KU_j) + (A_{kijl} * KU_k) + (A_{lkij} * KU_l) \leq 24; \quad (24)$$

$$A_{ijkl} \geq 0; \quad (25)$$

$$A_{ijk} + A_{jik} + A_{kij} + A_{lkij} = 1; \quad (26)$$

$$i \neq j \neq k \neq l; \quad (27)$$

Burada;

$i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ ; kömür ocakları,

$M_{i,j,k,l} = i, j, k$  ya da  $l$  ocağının mesafesi,

$K_{i,j,k,l} = i, j, k$  ya da  $l$  ocağının kalorifik değeri,

$S_{i,j,k,l} = i, j, k$  ya da  $l$  ocağının kükürt değeri,

$W_{i,j,k,l} = i, j, k$  ya da  $l$  ocağının nem değeri,

$KU_{i,j,k,l} = i, j, k$  ya da  $l$  ocağının kül değeri,

$A_{ij}$ :  $i$  ocağının  $j$  ocağıyla yaptığı karışımında aldığı oran,

$A_{ijk}$ :  $i$  ocağının  $j$  ve  $k$  ocaklarıyla yaptığı karışımında aldığı oran,

$A_{ijkl}$ :  $i$  ocağının  $j, k$  ve  $l$  ocaklarıyla yaptığı karışımında aldığı oran.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında Eşitlik 1-27 de verilen model çözümlenmiş ve 2'li, 3'lü ve 4'lü harman modellerine ait çözümler her karışıma göre ayrıca yorumlanmıştır. 4'lü harmanlamada sınır değerler sağlanmadığı için optimum çözüm bulunamamıştır.

#### 3.1. İkili harmanlama modelleri

Orhaneli ve Keles havzalarından üretilen kömürler ile yapılan 2'li karışıma ait sonuçlar Tablo 4'de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 5'de, Orhaneli ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 6'da ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 7'de, Keles ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 8'de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 9'da, Tunçbilek ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 10'da ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi ise Tablo 11'de verilmiştir. Orhaneli ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürlerin düşük nem içerikleri nedeniyle minimum nem kısıtı sağlanmadığından, Keles ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürlerin ise yüksek nem içerikleri nedeniyle maksimum nem kısıtı sağlanmadığından harmanlama yapılamaz.

**Tablo 4.** Orhaneli / Keles İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ij}$	0,372	0,00
$A_{ji}$	0,628	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	39,86	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	689,72	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	88,37
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	2,46	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	1,53	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	8,46	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	39,86 km	

Tablo 4’de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 39,86 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ij}=0,372$  ve  $A_{ji}=0,628$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Bursa-Keles ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %37,2, Bursa-Keles ocağından ise %62,8 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. İkil modele eklenen aylak ve artık değişkenlerin, indirgenmiş maliyet sütunundan alınan ikil modelin en iyi çözümündeki değerleri gösterir. Asıl modelin iki değişkeni olduğu için ikil model iki kısıtlı olacağından, ikil modelde iki adet aylak ve artık değişken oluşacaktır. Modellerin en iyi halinde eğer bir değişken modelde asıl olarak bulunmuyorsa fakat bu modele asıl olarak girmesi gerekirse, bu değişkenin herhangi bir değerine göre indirgenmiş maliyet, uzaklık değerinden ne kadar zarar edebileceğini gösterir. Dual modelin kısıtları tam olarak gerçekleştiğinde çözüme göre bu değerler “0” olmaktadır. Bu, asıl modelin en iyi çözümünde hem değer aldığı hem de değişkenlerin ana değişken olduğunu gösterir. Temel modele göre eklenen kısıtların aylak/artık değişkenlerinin aldıkları en iyi değerler, aylak ve artık değişkenler sütunundan okunmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, minimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlemlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer için, sınır değerine bakıldığında, 689,72 kcal/kg kullanılan kaynak bulunduğu gözlemlenmektedir. İstenen kalorifik değerin 2560 kcal/kg’den büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 3249,72 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 88,37’lik azalış ve artış olacaktır.

**Tablo 5.** Orhaneli / Keles İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ij}$	16	38	$-\infty$
$A_{ji}$	54	$+\infty$	38
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	689,72	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,05	0,09
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	2,46
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	1,53	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	8,46

Tablo 5'e bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 38 km artırılıp  $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'in uzaklığa olan etkisi  $(-\infty, 54]$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ji}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ji}$ 'in uzaklığa olan katkısı 54 km olup, istenilirse 38 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[16, +\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem için 2,46 birim, kül değeri için 8,46 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 689,72 kcal/kg, minimum nem değeri için 1,53 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

**Tablo 6.** Orhaneli / Seyitömer İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ij}$	0,156	0,00
$A_{ji}$	0,844	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	118,94	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	70,78	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	381,25
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	1,56	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	2,44	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	1,66	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	118,94 km	

Tablo 6'da, amaç fonksiyonu yani uzaklık 118,94 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ij}=0,156$  ve  $A_{ji}=0,844$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Kütahya-Seyitömer ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %15,6, Kütahya-Seyitömer ocağından ise %84,4 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, minimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer, sınır değerine bakıldığında 70,78 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değer 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2630,78 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlarsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 381,25'lik azalış ve artış olacaktır.

**Tablo 7.** Orhaneli / Seyitömer İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ij}$	16	122	$-\infty$
$A_{ji}$	138	$+\infty$	122
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	70,78	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,78	0,12
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	1,56
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	2,44	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	1,66

Tablo 7'ye bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 122 km artırılıp  $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'in uzaklığa olan etkisi  $(-\infty, 138]$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ji}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ji}$ 'in uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 122 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[16, +\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem için 1,56 birim, kül değeri için 1,66 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 287,78 kcal/kg, minimum nem değeri için 2,44 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

**Tablo 8.** Keles / Tunçbilek İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ij}$	0,889	0,00
$A_{ji}$	0,111	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	57,77	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	287,78	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,22	0,00
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	1,88
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	57,77 km	

Tablo 8'de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 55,77 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ij}=0,889$  ve  $A_{ji}=0,111$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Keles / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Keles ocağından %88,9, Kütahya-Tunçbilek ocağından ise %11,1 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, maksimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Minimum nem, kükürt, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer, sınır değerine bakıldığında 287,78 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değer 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2847,78 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, maksimum nem kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 1,88'lik azalış ve artış olacaktır.

**Tablo 9.** Keles / Tunçbilek İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ij}$	54	34	$-\infty$
$A_{ji}$	88	$+\infty$	34
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	287,78	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	$+\infty$	0,22
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	2,00	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	4,00	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	4,00

Tablo 9'a bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 54 km olup, istenilirse 34 km artırılıp  $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'in uzaklığa olan etkisi  $(-\infty, 88]$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun

çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ij}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ij}$ 'nin uzaklığa olan katkı 88 km olup, istenilirse 34 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[16,+\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda kükürt değeri için 0,22 birim, kül değeri için 4,00 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değeri için 287,78 kcal/kg, minimum nem değeri için 4,00 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

**Tablo 10.** Tunçbilek / Seyitömer İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ij}$	0,75	0,00
$A_{ji}$	0,25	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	125,50	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	202,25	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,205	0,00
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-3,125
Kül değeri kısıt fonksiyonu	0,25	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	125,50 km	

Tablo 10'da, amaç fonksiyonu yani uzaklık 125,50 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ij}=0,75$  ve  $A_{ji}=0,25$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Kütahya-Tunçbilek / Kütahya-Seyitömer ocaklarının harmanında Kütahya-Tunçbilek ocağından %75, Kütahya-Seyitömer ocağından ise %25 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kükürt, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer, sınır değerine bakıldığında 202,25 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değer 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2762,25 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalışında 3,125'lik azalış olacaktır.

**Tablo 11.** Tunçbilek / Seyitömer İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ij}$	138	$+\infty$	50
$A_{ji}$	88	50	$-\infty$
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	202,25	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	$+\infty$	0,205
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	0,80	12,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	0,25

Tablo 11'e bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 50 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[88,+\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ji}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan katkı 88 km olup, istenilirse 50 km arttırılıp  $-\infty$ 'a dek azaltılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan



etkisi(-∞,138] aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 4,00 birim, kükürt değeri için 0,205 birim, kül değeri için 0,25 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 202,25 kcal/kg artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 0,80 birim artış 12,00 birim azalış uygulanabilir.

### 3.2. Üçlü harmanlama modelleri

Orhaneli, Keles ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan üçlü karışıma ait sonuçlar Tablo 12’de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 13’de, Orhaneli, Seyitömer ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan üçlü karışıma ait sonuçlar ise Tablo 14’de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi ise Tablo 15’de verilmiştir. Orhaneli, Keles, Seyitömer ve Keles, Seyitömer, Tunçbilek üçlü harmanlarında ise sınır değerler sağlanamadığı için optimum çözüm bulunamamıştır.

**Tablo 12.** Orhaneli / Keles / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ijk}$	0,43	0,00
$A_{jik}$	0,52	0,00
$A_{kij}$	0,05	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	39,3	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	835,3	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	78,78
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-0,34
Kül değeri kısıt fonksiyonu	9,14	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	39,3 km	

**Tablo 13.** Orhaneli / Keles / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ijk}$	16	9,33	-∞
$A_{jik}$	54	+∞	5,06
$A_{kij}$	88	11,07	91,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	835,3	-∞
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,55	0,33
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	+∞	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	1,53	7,72
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	+∞	9,14

Tablo 12’de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 39,3 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ijk}=0,43$ ,  $A_{jik}=0,52$  ve  $A_{kij}=0,05$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Bursa-Keles / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %43, Bursa-Keles %52 ve Kütahya-Tunçbilek ocağından %5 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt ve minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sınırlı olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 13'e bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 9,33 km artırılıp  $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'in uzaklığa olan etkisi  $(-\infty, 54]$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ji}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ji}$ 'in uzaklığa olan katkı 54 km olup, istenilirse 5,06 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[16, +\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{kij}$ 'nin amaç fonksiyonu katkısı 88'dir. Bu değer 11,07 birim artırılıp, 91 birim azaltılabilir. Bu durumda maksimum nem 4,00 birim, kül değeri için 9,14 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 835,3 kcal/kg, artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 1,53 birim artış 7,72 birim azalış, kükürt değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 0,55 birim artış 0,33 birim azalış uygulanabilir.

**Tablo 14.** Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
$A_{ijk}$	0,29	0,00
$A_{jik}$	0,64	0,00
$A_{kij}$	0,07	0,00
	<b>Aylak ve artık değişkenler</b>	<b>İkil değişkenler</b>
Amaç fonksiyonu	99,2	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	429,96	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	128,3
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-8,1
Kül değeri kısıt fonksiyonu	4,27	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	99,2 km	

**Tablo 15.** Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
$A_{ijk}$	16	90,7	$-\infty$
$A_{jik}$	138	$+\infty$	97,5
$A_{kij}$	88	286,4	145,2
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	429,96	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,08	0,20
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	2,44	7,72
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	4,27

Tablo 14'de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 99,2 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri  $A_{ijk}=0,29$ ,  $A_{jik}=0,64$  ve  $A_{kij}=0,07$  alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Kütahya-Seyitömer / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %29, Kütahya-Seyitömer %64 ve Kütahya-Tunçbilek ocağından %7 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt ve minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 15'e bakıldığında  $A_{ij}$  değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 90,7 km artırılıp  $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde  $A_{ij}$ 'in uzaklığa olan etkisi  $(-\infty, 138]$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{ji}$  değişkeninde ise bu durum tam tersidir.  $A_{ji}$ 'in uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 97,5 km azaltılıp  $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde  $A_{ji}$ 'nin uzaklığa olan etkisi  $[16, +\infty)$  aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır.  $A_{kij}$ 'nin amaç fonksiyonu katkısı 88'dir. Bu değer 286,4 birim arttırılıp, 145,2 birim azaltılabilir. Bu durumda maksimum nem 4,00 birim, kül değeri için 4,27 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 429,96 kcal/kg, artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 2,44 birim artış 7,72 birim azalış, kükürt değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 0,08 birim artış 0,20 birim azalış uygulanabilir.

Doğrusal programlama ile oluşturulan ve çözümlenen tüm harman grupları Tablo 16'da özetlenmiştir. Tablo 16'da verilen harman gruplarının maliyetleri modellerin çözümlenmesi sonucu bulunan amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

**Tablo 16.** Harmanlama Sonuçları.

Harmalama Modeli	Oran (%)	Maliyet (TL/ton)*	Kalorifik Değer
Orhaneli / Keles	37,2 / 62,8	11,68	3249,72
Orhaneli / Seyitömer	15,6 / 84,4	34,82	2630,78
Keles / Tunçbilek	88,9 / 11,1	16,93	2847,78
Tunçbilek / Seyitömer	75 / 25	29,45	2762,25
Orhaneli / Keles / Tunçbilek	43 / 52 / 5	11,54	3395,30
Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek	29 / 64 / 7	29,04	2989,96

\*Not: Maliyet hesaplamalarında; üretim maliyetlerinin dört kömür ocağında da eşit olduğu, Her ocak için kapasitesi 30 ton olan kamyon kullanıldığı, Kamyonun yakıt tüketiminin 20 L/100km olduğu ve motorin fiyatının ise ~44 TL olduğu kabul edilmiştir.

#### 4. Sonuç

Enerji maliyeti, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve ürün kalitesinin sağlanması termik santraller açısından büyük bir sorundur. Çünkü termik santraller dünyadaki en büyük elektrik üreten tesislerinden biridir. Bu nedenle enerji sektöründe hammadde/kaynak tüketimi optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, dört farklı ocağın üretilen kömür malzemesi, uygun kalitede bir ürün oluşturabilmek için doğrusal programlama kullanılarak harmanlanmıştır. Harmanlama problemi doğrusal bir optimizasyonla formüle edilmiştir. Amaç fonksiyonu toplam maliyetleri ve dolayısıyla hammadde tüketimini en aza indirecek şekilde belirlenmiştir. Kömür için termik santralde kullanılması uygun sınır değerler ise modelde kısıtlar olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak farklı kimyasal ve ısıl özelliklere sahip kömürler harmanlama optimizasyonu ile termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir. Buna göre toplam 6 farklı harman grubu belirlenmiştir. Bunlar;

- Orhaneli / Keles ocaklarının harmanlaması yapılmış ve Orhaneli ocağının %37,2 oranında, Keles ocağından ise %62,8 oranında, kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu harmanlamanın toplam nakliye maliyeti 11,68 TL/ton olarak bulunmuştur.
- Orhaneli / Seyitömer ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %15,6 oranında, Seyitömer ocağından ise %84,4 oranında kullanılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 34,82 TL/ton'dur.
- Keles / Tunçbilek ocaklarının harmanında Keles ocağından %88,9 oranında, Tunçbilek ocağından ise %11,1 oranında kullanılarak toplam nakliye maliyeti 16,93 TL/ton bulunmuştur.
- Tunçbilek / Seyitömer ocaklarının harmanında Tunçbilek ocağından %75 oranında, Seyitömer ocağından ise %25 oranında kömür kullanılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 29,45 TL/ton'dur.
- Orhaneli / Keles / Tunçbilek ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %43, Keles %52 ve Tunçbilek ocağından %5 oranında kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu harmanlamanın toplam nakliye maliyeti 11,54 TL/ton'dur.
- Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %29, Seyitömer %64 ve Tunçbilek ocağından %7 oranında kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 29,04 TL/ton bulunmuştur.

Buna göre; toplam 6 harman grubu içerisinde maliyetler açısından Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3'ü harmanı ve Orhaneli / Keles 2'li harmanlarının en düşük maliyet değerleri ve en yüksek kalorifik değerleri verdiği görülmektedir. Verilen oranların harmanlanması kömür ocaklarında geçerlidir. Ancak kaynakların sürdürülebilir kullanımı açısından harmanlama modelindeki sınır değerler değiştirilerek farklı harman grupları ve oranları oluşturulabilmektedir. Ayrıca kömür ocaklarında karşılaşılabilecek farklı üretim parametreleri de kolaylıkla harmanlama modeline uyarlanabilmektedir. Geliştirilen modelin tüm kömür ocaklarında kolay bir şekilde kullanılabilmesi ve böylece mühendislere ve araştırmacılara büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir. Günümüzde kaynakların verimli kullanımı ve sürdürülebilir üretim, üretim kalitesinin devamlılığını sağlayacak harmanlama politikalarının geliştirilmesi ile ilişkilidir. Bu çalışmada önerilen modellerin uygulanabilirliği açısından daha çok sayıda ve farklı saha özelliklerine sahip sahalarda denenerek güvenilirliği artırılmalıdır. Ayrıca harmanlama modeli içerisinde söz konusu olan subjektif ya da sayısal olarak ifade edilemeyen parametrelerin de hesaba katılabilmesi için bulanık mantık gibi sezgisel yöntemlerin de kullanımının araştırılması gerekmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Miller BG. Coal Energy Systems, Elsevier Academic Press, 2005, ISBN: 0-12-497451-1.
- [2] Rahman R. Widodo S. Azikin B and Tahir D. Chemical Composition And Physical Characteristics Of Coal And Mangrove Wood As Alternative Fuel, Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1341 (5).
- [3] Prabowo H and Prengki I. Decreasing The Ash Coal And Sulfur Contents Of Sawahlunto Subbituminous Coal By Using "Minyak Jelantah", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 413 (1).
- [4] Unsworth JF, Fowler CS, Heard NA, Weldon VL, McBrierty VJ. Moisture in Coal: 1. Differentiation Between Forms Of Moisture By N.M.R. And Microwave Attenuation Techniques, 1988, 67(8), 1111–1119.
- [5] Casagrande D and Siefert K. Origins of Sulfur in Coal: Importance of the Ester Sulfate Content of Peat, Science, 1977, Vol 195, Issue 4279, 675-676.
- [6] Chen-Lin C. Sulfur in Coals: A Review Of Geochemistry And Origins, International Journal Of Coal Geology, 2012, Vol 100, 1-13.
- [7] Sarkar DK. Thermal Power Plant Design and Operation, Chapter 3 - Fuels and Combustion, 2015, 91-137.
- [8] Delibalta MS. Türkiye'de Fosil Enerji Kaynakları ve Yeni Nesil Termik Santrallerin Önemi, Uluslararası Enerji, Ekonomi ve Güvenlik Kongresi-ENSCON'18, 2018, ISBN: 978-605-81728-2-1, s.22-34, 21-22 Nisan, Kozyatağı/ İstanbul-Türkiye.
- [9] Adiguzel D. Optimisation of Pre-Blending Process for Raw Materials in Quarrying, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2020, 34(7), 519-530.
- [10] Yuan Y, Qu Q, Chen L, Wu M. Modeling and Optimization of Coal Blending and Coking Costs Using Coal Petrography. Inf Sci, 2020, 522, 49–68.
- [11] Xi-Jin G, Ming C, Jia-Wei W. Coal Blending Optimization of Coal Preparation Production Process Based on Improved GA, Procedia Earth Planet Sci, 2009,1, 654–660.
- [12] Yin C, Luo Z, Zhou J ve Cen K. A Novel Non-Linear Programming –Based Coal Blending Technology For Power Plants, Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(1), 118-124.
- [13] Eleveli B, Uzgören N and Sezgin A. Coal Distribution Optimization by Utilizing Linear Programming, Engineering & Arch Faculty, Eskisehir Osmangazi University, 2007, 10(1).
- [14] Cebeci V. Kömür Gazlaştırma Prosesi Ve Türkiye Kömürlerinde Kömür Özellikleri Açısından Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [15] Emre H. Seyitömer (Kütahya) Kömür Havzasının Isıl Değerlerine Göre Rezerv Hesabı, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 1999, 12.
- [16] Kazancı C. Tunçbilek (Tavşanlı-Kütahya) Fc Pano Açık İşletme Sahası Kömürlerinin Organik Fasiyes Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [17] Şengüler İ. Güney Marmara Bölgesi Kömürleri, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 2004, 28(2), 31-38.
- [18] Karaçanta C. Termik Santrallerde Kullanılan Kömürlerin Mineral Madde İçeriğindeki İz Elementlerin Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [19] Farghaly MG, Ali M, Kim JG. Optimization of Blending and Production Processes Considering Origin Mines and Metallurgical Units Using Linear Programming Rules, Geosystem Engineering, 2021, 24(3), 115-121.



## Simultaneously Enhancing the Dynamic Damping and Static Strength Capabilities of Structures: A Case Study Conducted on Fly Ash-based Geopolymer Concrete Specimens using Modal, Mechanical and Microstructural Investigations

Ferhat Çeçen<sup>1</sup>, Ahmet Özbayrak<sup>2\*</sup>, Bekir Aktaş<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Göller Bölgesi Teknokent Coordinatorship, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye

<sup>2,3</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Kayseri, Türkiye

<sup>1</sup> cecenferhat@sdu.edu.tr, <sup>2\*</sup> ozbayrak@erciyes.edu.tr, <sup>3</sup> baktas@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 08/05/2024;

Kabul/Accepted: 13/09/2024)

**Abstract:** Enhancing both the dynamic damping and static strength of ordinary Portland cement (OPC) concrete simultaneously is a significant challenge. Geopolymer concrete (GPC), particularly fly ash-based GPC, offers a promising alternative. This study explores the relationship between damping and strength in heat-cured, low-calcium fly ash-based GPC using sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) activators. The findings reveal that SS activators demonstrate stronger positive correlations between damping and strength compared to SH activators. Microstructural analysis indicated that increasing SS dosage from 55 kg/m<sup>3</sup> to 98 kg/m<sup>3</sup> resulted in a 17% increase in dynamic damping ratios and a 39% increase in static compressive strength. These results highlight the potential of GPC to surpass OPC concrete in applications requiring both enhanced damping and strength, offering a dual benefit not typically achievable with OPC. The study contributes to a deeper understanding of GPC's capabilities, paving the way for its broader adoption in construction projects.

**Key words:** Geopolymer concrete, Microstructure, Compressive strength, Damping ratio, Resonance frequency.

### Yapıların Dinamik Sönümlenme ve Statik Dayanım Yeteneklerinin Eş Zamanlı Olarak Geliştirilmesi: Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton Numuneler Üzerinde Modal, Mekanik ve Mikroyapısal İncelemeler Kullanılarak Gerçekleştirilen Bir Vaka Çalışması

**Özet:** Portland çimentosu (OPC) betonu için hem dinamik sönümlenmeyi hem de statik dayanımı aynı anda artırmak, önemli bir zorluktur. Geopolimer beton (GPC), özellikle uçucu kül bazlı GPC, umut verici bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışma, düşük kalsiyumlu uçucu kül bazlı GPC'de sönümlenme ve dayanım arasındaki ilişkiyi, sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) aktivatörleri kullanarak araştırmaktadır. Bulgular, SS aktivatörlerinin SH aktivatörlerine kıyasla sönümlenme ve dayanım arasında daha güçlü pozitif korelasyonlar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Mikroyapı analizi, SS dozajının 55 kg/m<sup>3</sup>'ten 98 kg/m<sup>3</sup>'e artırılmasının dinamik sönümlenme oranlarında %17 ve statik basınç dayanımında %39 artışa neden olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, GPC'nin OPC betona kıyasla her iki özelliğin de artırılması gereken uygulamalarda üstün olma potansiyelini vurgulamakta ve OPC ile tipik olarak elde edilemeyen çift fayda sunmaktadır. Çalışma, GPC'nin yeteneklerini daha iyi anlamaya katkıda bulunarak, inşaat projelerinde daha geniş çapta benimsenmesinin önünü açmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Geopolimer beton, Mikroyapı, Basınç dayanımı, Sönüm oranı, Rezonans frekansı.

## 1. Introduction

Most structures inevitably experience dynamic loadings, including low-amplitude ones from vehicular traffic and human movement, as well as intense loads from large earthquakes, strong wind, and vehicle impacts [1]. Under these conditions, structural materials' dynamic characteristics and damping behaviors are, at least, just as important as their static capacities [2]. As stated in the literature, enhancement of the dynamic damping ratio, even with an increase of 10%–15%, might be a practical approach to suppressing excessive vibrations without using additional dampers or control devices [3].

Currently, during the construction of buildings or structures, one of the most preferred materials is reinforced or pre-stressed concrete. In this context, ordinary Portland cement (OPC) concrete has almost all the market share among the existing concrete types. This OPC concrete can be produced with a wide range of static compressive strength capacities. However, “higher strength” classes are needed or preferred by engineers, especially for qualified projects. Because it provides numerous benefits, such as increased static design load capabilities [4], less reinforcement usage [5], much better bond strength and decreased permeability [6], smaller concrete cross-sectional sizes [4], and higher early age strength [6]. This last advantage is especially needed for pre-stressed or prefabricated members. However, in most cases, increasing the static strength of OPC concrete also causes

\* Sorumlu yazar: [ozbayrak@erciyes.edu.tr](mailto:ozbayrak@erciyes.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-2100-8071, <sup>2</sup> 0000-0002-8091-4990, <sup>3</sup> 0000-0003-3072-7983

increases in brittleness [5], static and dynamic moduli of elasticity [7, 8], dynamic shear modulus [8], raw material costs [9], and greenhouse gas emissions [10]. Similarly, lower vibration or impact damping, lower resonance resistance [8, 11], and less sound insulation [12] can be stated as the other disadvantages of this static strength increase. Nowadays, the dynamic performance of OPC concrete can be enhanced with several methods, such as using a higher water-to-cement ratio [13, 14], lower modulus / lightweight / higher porosity aggregates (such as weathered granite, zeolite, vermiculite, etc.) [14, 15], chopped fiber reinforced polymers [16, 17], crumb rubber particles or powder [16, 18, 19], several chemical additives (such as ester copolymer emulsions, methylcellulose, air entraining agents, etc.) [14, 17, 20], and supplementary cementitious materials (SCM) (such as silica fume, fly ash, slag, and other minerals) [14, 18].

On the other hand, some of the dynamic damping performance-increasing methods mentioned above are still controversial, and there is no consensus. For example, some researchers reported contrary results for SCM materials, especially under higher frequency dynamic loads [17, 21]. The main reason for these different results is that some of the methods mentioned above do not "directly" increase the damping behavior of OPC concrete. Instead, if proper techniques are not applied, they reduce workability (because of their higher surface area), resulting in study-specific, variable results. In addition, some of them decrease the compressive strength capabilities at an early age and/or 28th day of curing. In those cases, they may cause more air gaps, less hydration development, and a weaker ITZ (interfacial transition zone). As a result, they may "indirectly" increase damping if their damping ratio-reducing effects are overcome (for example, SCM materials' filler effects & pozzolanic-reaction-induced damping ratio-lowering effects [21]). These determinations have been summarized and generalized in the literature. As stated, damping arises from the structures' or materials' elasticity, raw materials' dissipation, ITZ dimensions, solid gel structure, water-filled pores, and imperfections in the microstructure, such as voids, fractures, micro cracks, and cracks [22-24]. As seen, the factors that increase the dynamic performance are mainly the reasons that decrease the static strength. For example, a higher water-to-cement ratio provides a higher damping ratio because its internal structure and ITZ zones are more porous and have micro cracks [24, 25].

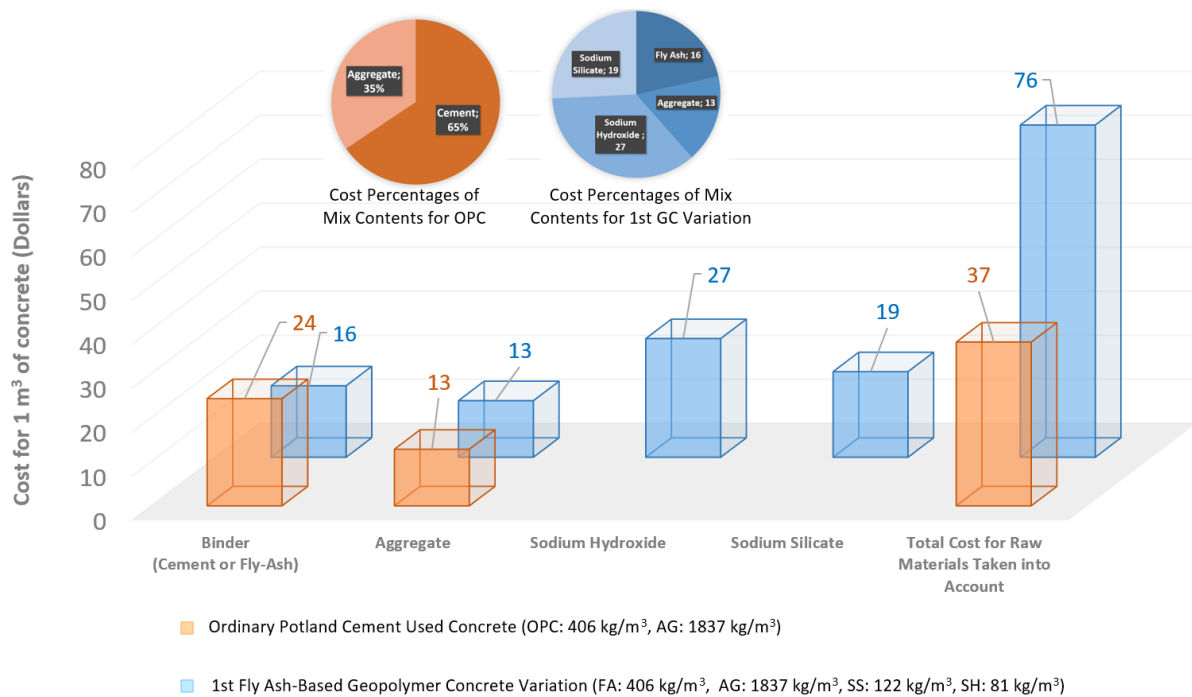
As deduced from the presented literature review, almost all of the methods that increase the dynamic damping performance of OPC concrete cannot "simultaneously" or "co-currently" increase the static compressive strengths [14, 16-18, 20]. This shortcoming of OPC concrete is still challenging for engineers, and academic investigations are continuing. Engineers are making an optimum "concrete mixture" decision in this vicious circle by sacrificing some of both the dynamic damping ratios and static compressive strengths. It is a fact that they need additional static strength-increasing methods alongside the existing dynamic performance-enhancing processes, especially for projects that require high static strength [18].

On the other hand, in recent decades, a new-generation building material named geopolymer concrete (GPC) has emerged and has been successfully used in many projects worldwide [26]. In this increasing success, its durability, high early strength, and low carbon footprint benefits played influential roles [27, 28]. Researchers have investigated many engineering properties of GPC products [26-33]. However, the available information about the dynamic (modal) characteristics of the GPC material is minimal [31-33]. Additionally, in these few studies, any relationship between the static & dynamic characteristics of GPC variations produced with variable activator types and dosages has yet to be reported. However, as deduced from the previously presented literature review, the reciprocal change behavior of "the static compressive strength and dynamic damping ratio" is crucial for structural materials.

As stated, the dynamic performance of OPC concrete can be enhanced with higher liquid ingredient dosages (higher water-to-cement ratio); however, it also causes static strength decreases [13, 14, 24, 25]. According to the literature, higher liquid ingredient (chemical activator solution) dosages also increase the damping performance of GPC [33]. However, the "co-currently increasing of the dynamic damping ratio and static compressive strength" issue has yet to be investigated for GPC variations produced with variable activator dosages. This issue was aimed at being investigated by the authors; however, any relationship between the static compressive strength and modal parameters could not be reported. Then, it was concluded that this complex relationship requires detailed and directly focused research [33].

In the production of GPC, rich-in-aluminosilicate raw materials such as slag, fly ash (FA), rice husk ash, red mud, metakaolin, silica fume, etc., are used as binder [34]. Among these aluminosilicate sources, fly ash material was preferred to be investigated in this study due to its widespread availability and significant environmental benefits. As stated in the literature, approximately one thousand million tons of FA are annually emitted by several industries and power-generating plants in the world, which causes a significant ecological problem [35]. For example, FA particles contain an essential number of heavy metals, and there is a risk of heavy metal leaching into nature if this industrial waste material is not recycled or disposed of [36]. In this context, FA-based GPC is introduced as an ideal structural material for eliminating environmental risks from FA or other hazardous wastes (wastewater, etc.) with its superior surface area, porosity, chemical resistance, mechanical strength, durability, and chemical affinity characteristics [36-39].

Unlike OPC concrete, which uses water for hydration, GPC production needs a high pH (alkaline) medium during polymerization. In this context, several chemical activators such as sodium hydroxide (SH) (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium silicate (SS) (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), and potassium silicate (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) are used to provide this high alkalinity [40]. Among these activators, the SS and SH activators, the most commonly used ones in the literature, were preferred to be investigated in this preliminary research study. Some researchers stated that GPC would soon be one of the most used building materials in the world if it could be produced at reasonable costs [41]. Because the high cost of chemical activators used in production hinders GPC's commercialization and extensive usage. An example of a raw material cost comparison is presented in Figure 1. This figure compares the cost of a GPC mix with that of an OPC concrete mix. The GPC and OPC concrete variations are designed with a constant binder (OPC, FA) and aggregate dosages. As seen, the current total cost of GPC is considerably (approximately %105) higher than OPC concrete, mainly due to the chemical activators. This extra cost can be partially increased or decreased by changing the types and dosages of activators.



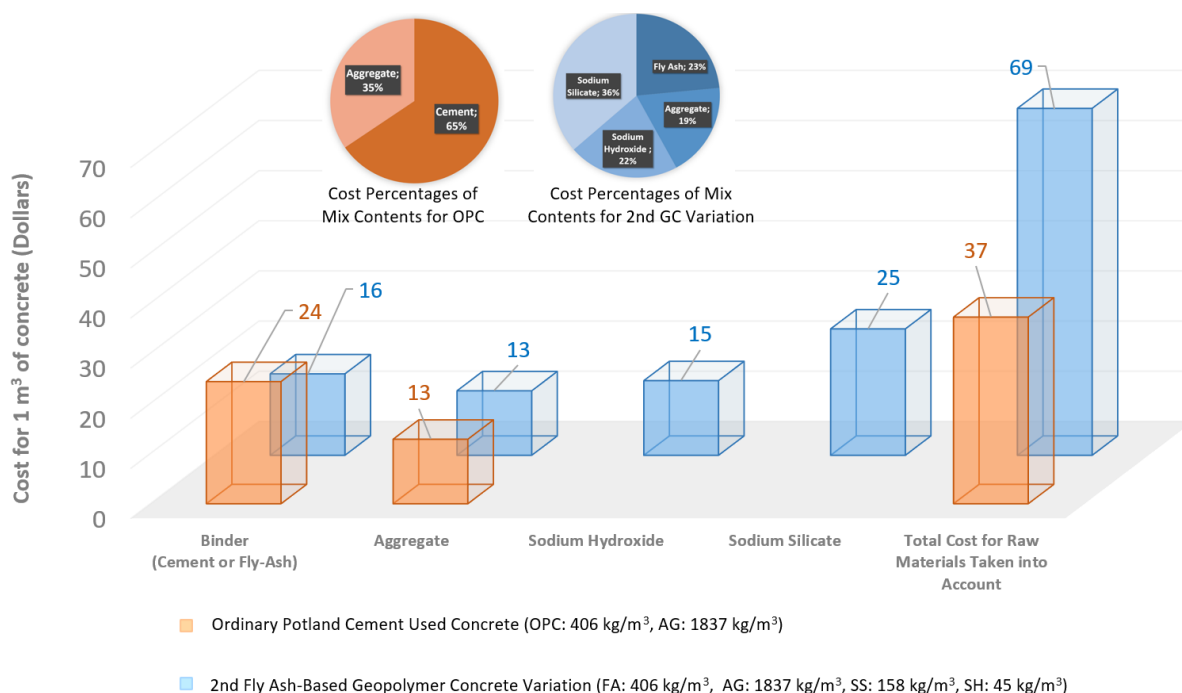
**Figure 1.** Raw material cost comparison of a GPC variation with OPC concrete (AG: Aggregate).

If the activator dosages in Figure 1 are adjusted to the values in Figure 2 the cost difference of 105% can be decreased to 86%. However, more than these saving percentages are needed to increase the GPC's commercialization and extensive usage rapidly.

As seen, the high costs of chemical activators hinder GPC's commercialization and extensive usage. On the other hand, enhancing the dynamic damping ratios and static compressive strengths of ordinary Portland cement (OPC) concrete, co-currently, is still a challenge for engineers. In this aspect, the “co-currently increasing of the dynamic damping ratio and static compressive strength” characteristic of GPC can provide a significant advantage if it exists.

This situation resembles the fact that fiber-reinforced polymer (FRP) products now have a considerable market share in the concrete reinforcing sector because of their specific advantages despite higher costs. For example, these FRP products have gained an essential share in piers, bridges, and earthquake-strengthening projects, where corrosion resistance, unit volume weight, and high mechanical strength parameters are more crucial than their higher costs. Therefore, GPC will only reflect its environmental and social benefit potentials to the field if only it is appropriately produced and used. In this context, priority should be given to the correct use of activators, which have the most significant share in production costs, and the reciprocal change of in static and dynamic characteristics of GPC specimens produced with variable activator dosages must be investigated.





**Figure 2.** Raw material cost comparison of another GPC variation with OPC concrete.

Consequently, enhancing the dynamic damping ratios and static compressive strengths of ordinary Portland cement (OPC) concrete simultaneously remains a challenge for engineers. The potential of geopolymer concrete (GPC) to co-currently improve these properties could offer a significant advantage, yet this specific characteristic has not been thoroughly explored in the literature. Therefore, this study preliminarily investigates the effects of sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) activator solutions on the dynamic and static characteristics of fly ash-based GPC variations, aiming to address this gap and determine whether GPC can indeed provide such an advantage. During sample design, the binder (FA) and aggregate (basalt) types and dosages will remain constant for all produced specimens. And investigations will be concentrated only on the commonly used geopolymer concrete activators, the SS and SH. In addition, since this subject needs an experimental investigation from static, modal, and microstructural perspectives, all of these analyses are included in this study's scope.

## 2. Geopolymer Concrete Specimens Production

The FA used in this study was obtained from the Adana Sugözü İsken Power Plant in Türkiye. According to the X-ray fluorescence test results in Table 1, this FA is in the Class F category per ASTM C618.

**Table 1.** Chemical components of fly ash.

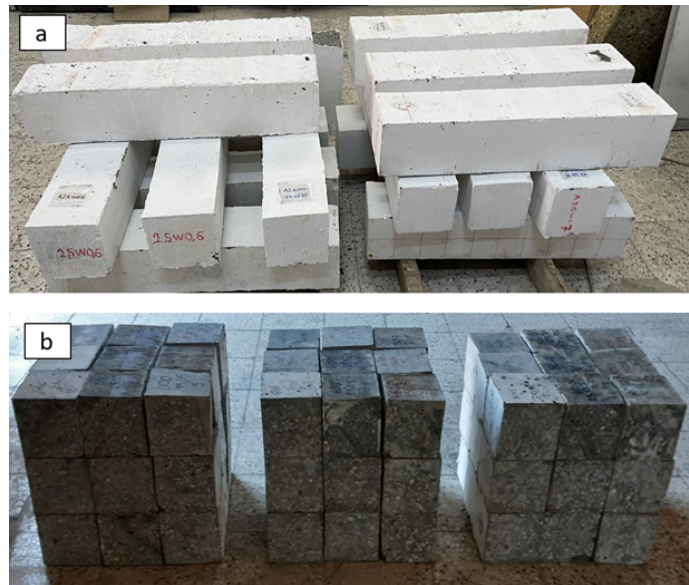
Components	%	ASTM C618 Limits
SiO <sub>2</sub>	55.9	Min. 54.9%
Sum of SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , and Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	85.9	Min. 70.0 %
SO <sub>3</sub>	0.33	Max. 5.0%
Na <sub>2</sub> O	1.35	Max. 1.5%
LOI (loss of ignition)	2.22	Max. 6.0%

**Table 2.** Mix dosages (kg/m<sup>3</sup>) and several other parameters of the variations investigated in this study.

Variation Code	FA	AG	SS	PSS	SH	PSH	AA	PA	PW	A Ratio	W Ratio
A1.5-W0.5	406	1837	122	54	81	29	203	83	120	1.5	0.5
A1.5-W0.6	406	1837	146	64	97	35	243	99	144	1.5	0.6
A1.5-W0.7	406	1837	171	75	114	41	285	116	169	1.5	0.7
A2.5-W0.5	406	1837	145	64	58	21	203	85	118	2.5	0.5
A2.5-W0.6	406	1837	174	77	70	25	244	102	142	2.5	0.6
A2.5-W0.7	406	1837	203	89	81	29	284	118	166	2.5	0.7
A3.5-W0.5	406	1837	158	70	45	16	203	86	117	3.5	0.5
A3.5-W0.6	406	1837	189	83	54	19	243	102	141	3.5	0.6
A3.5-W0.7	406	1837	221	97	63	23	284	120	164	3.5	0.7

Variation code: A(A ratio)-W(W ratio), FA: Fly ash dosage, AG: Total fine and coarse aggregate dosage, SS: Sodium silicate solution dosage, PSS: Pure SS dosage (water-less), SH: Sodium hydroxide solution dosage, PSH: Pure SH dosage (water-less), AA: Total activator solution (SS+SH), PA: Total pure activator dosage (PSS+PSH), PW: Pure water dosage, A ratio: SS/SH ratio, W ratio: AA/FA ratio

During the production of GPC specimens, commercially available river sand (0/4 mm), coarse basalt aggregate (7/14 mm), SS (modulus ratio of 2.06), and SH (14-M) were used. Table 2 shows the mixing dosage details of nine produced GPC variations. The additional calculated parameters in Table 2 provide investigate the A ratio (SS/SH), W ratio (AA/FA, where AA abbreviation is used for total alkaline activator dosage), total pure chemical activator dosage (PA), pure sodium silicate dosage (PSS), pure sodium hydroxide dosage (PSH), and pure water dosage (PW) effects, separately. Produced GPC variations in Table 2 were cast in 150x150x750 mm prism molds and cured at 90 °C for 24 hours. After de-molding, specimens were stored at room temperature for 28 days. Other information about the mix design, casting, and curing stages was presented in a previous study conducted by the authors [33]. Some of the produced prisms can be seen in Figure 3(a). These GPC prisms were first used for experimental modal tests and, after, were cut into 150x150x150 mm cubes (Figure 3(b)) for compressive strength tests.

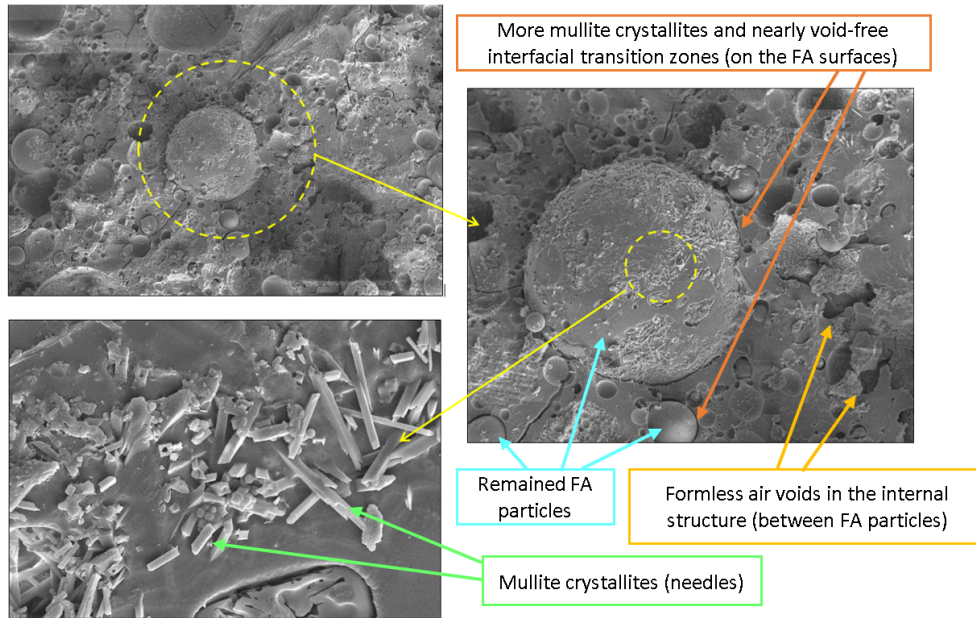


**Figure 3.** Produced 150x150x750 mm GPC prisms and 150x150x150 mm cubes obtained from these prisms.

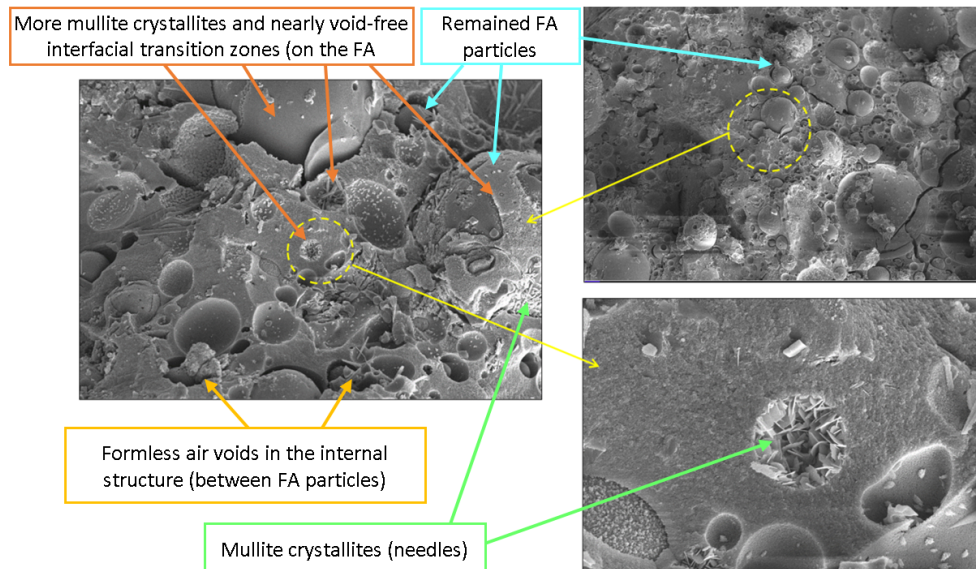
### 3. Scanning Electron Microscope (SEM)-based Microstructural Analysis

This section will present scanning electron microscope (SEM) images for preliminary evaluations. Figures 4 to 7 present some SEM image examples for the A1.5-W0.5 and A3.5-W0.5 coded specimens. During analysis, SEM image examples of only these two variations were considered sufficient for this study, where the effects of chemical activators are investigated. These two variations were preferred since they contain an identically equal dosage of fly ash (406 kg/m<sup>3</sup>), total aggregate dosage (AG) (1837 kg/m<sup>3</sup>), and W ratio (0.5). Also, these variations contain identically equal total activator dosage (AA) (203 kg/m<sup>3</sup>) and nearly equal pure water (PW) (117-120

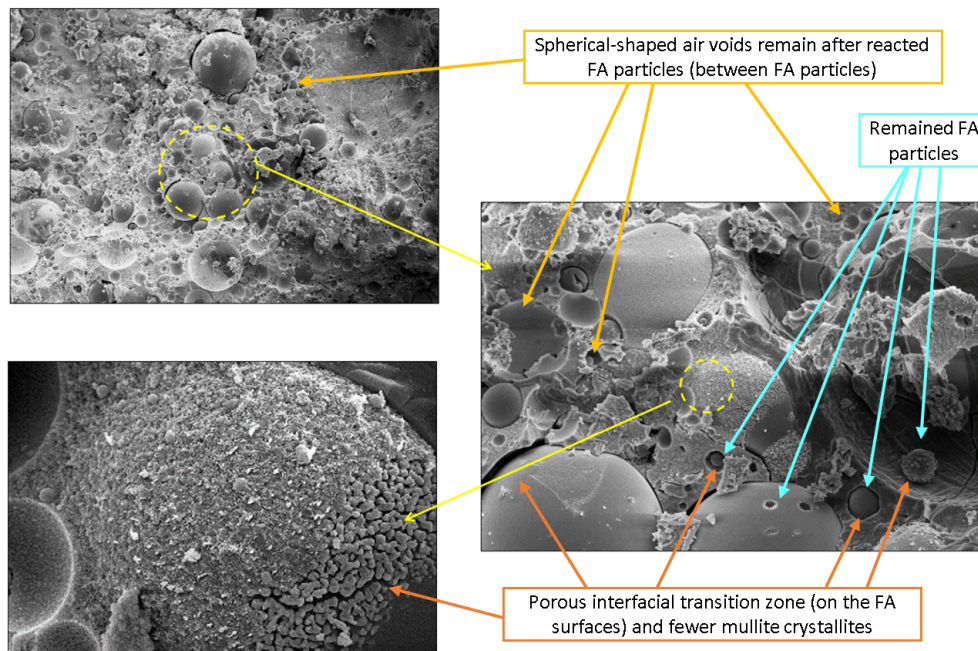
kg/m<sup>3</sup>) and pure activator (PA) (83-86 kg/m<sup>3</sup>) dosages. The only difference between these variations is the chemical activator ingredients. While the A1.5-W0.5 coded specimens contain 29 kg/m<sup>3</sup> pure sodium hydroxide (PSH) and 54 kg/m<sup>3</sup> pure sodium silicate (PSS), the A3.5-W0.5 coded ones have 16 kg/m<sup>3</sup> and 70 kg/m<sup>3</sup>, respectively. In the presented figures (Figures 4-7), unreacted (remained) FA particles, mullite crystallites (needle-shaped), and formless or spherical-shaped air voids (remain after reacted FA particles) are marked with descriptions for easy understanding.



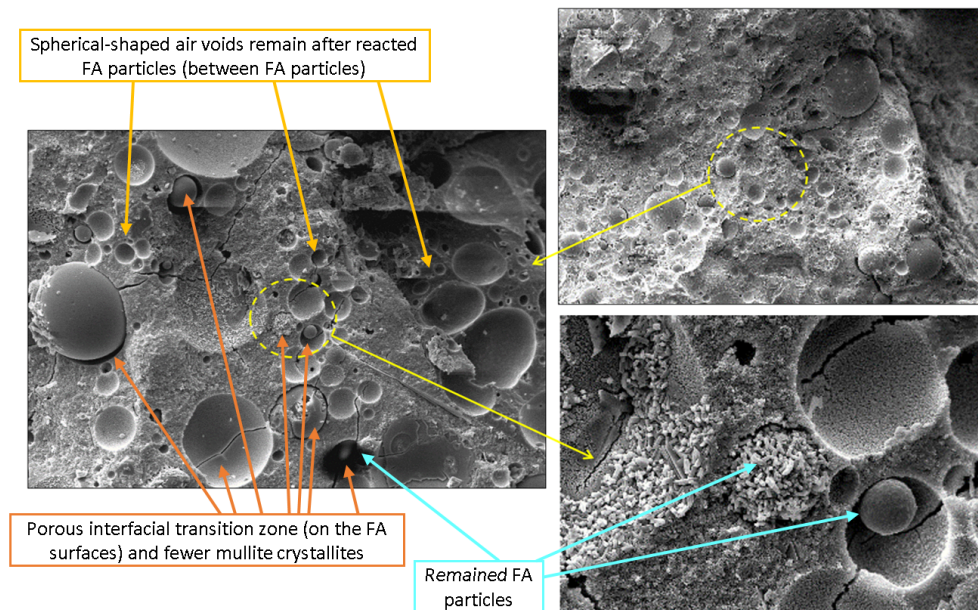
**Figure 4.** An SEM image (left-upper-side) and magnified forms (zoomed into the yellow dashed circles) taken from an A1.5-W0.5 coded specimens.



**Figure 5.** An SEM image (left-upper-side) and magnified forms (zoomed into the yellow dashed circles) taken from another A1.5-W0.5 coded specimens.



**Figure 6.** An SEM image (left-upper-side) and magnified forms (zoomed into the yellow dashed circles) taken from a A3.5-W0.5 coded specimens.



**Figure 7.** An SEM image (left-upper-side) and magnified forms (zoomed into the yellow dashed circles) taken from another A3.5-W0.5 coded specimens.

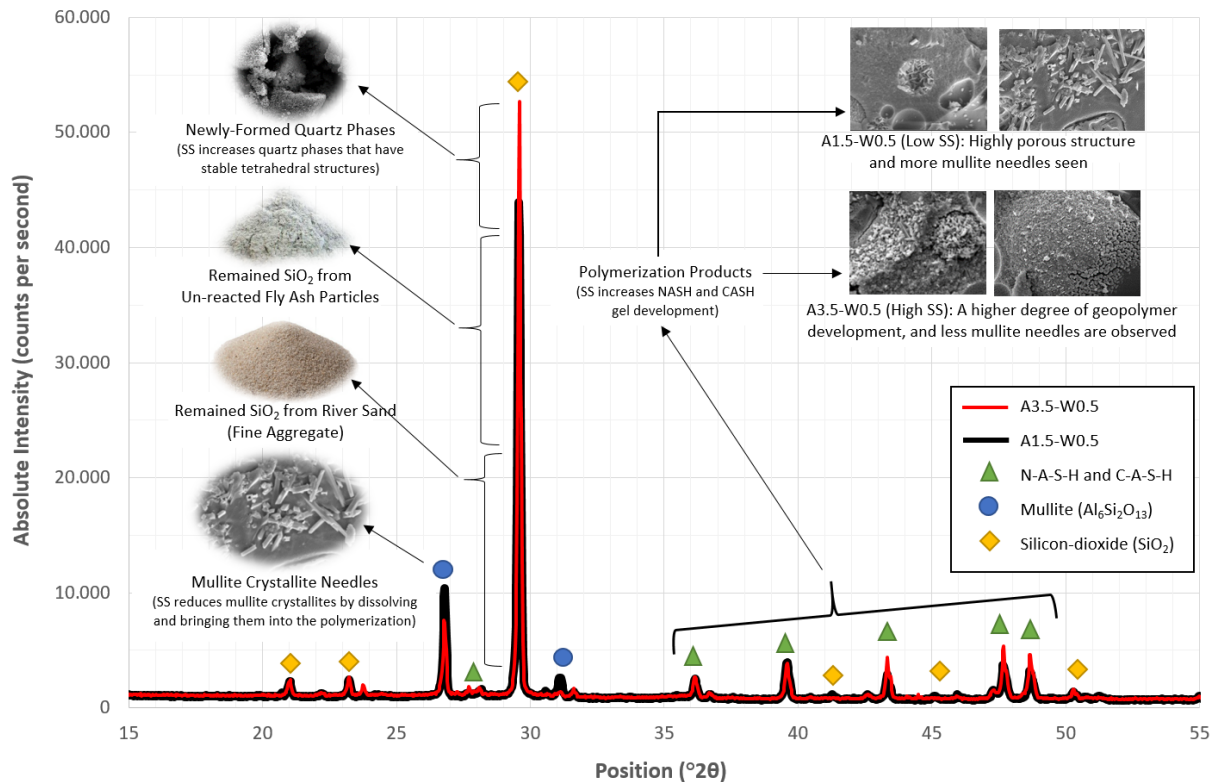
Figures 4 and 5 indicate a limited geopolymer development is in question, and a porous microstructure exists. Unreacted FA particles and shapeless air voids seen in these figures were effective in this evaluation. On the contrary, Figures 6 and 7 show that increasing the percentage of SS in the activator solution changes the microstructure. These figures show that FA particles are dissolved more or disappear completely, so a higher degree of geopolymer development is in question. In this condition, the shapeless air void-induced porosity between different FA particles was reduced with more geopolymer development, so a denser internal structure was observed. However, as seen from Figures 6 and 7, the spherical-shaped air void-induced porosity was

increased with more geopolymer development. On the other hand, porous interfacial transition zones on the FA surfaces (FA-ITZ) and fewer mullite crystallites were observed with increased SS in the activator solution.

The above findings are consistent with the other FA-based GPC studies [42-46] in the literature. However, these evaluations, like any other SEM analysis, are hypothetical and require several other investigation methods. From a superficial perspective, the SS activator may increase the static compressive strength and decrease the dynamic damping ratio as a result of a denser internal structure via the increasing geopolymer development characteristic. However, the effect of extra spherical voids and the porous FA-ITZ structure, described above, should also be addressed. These last differences may not decrease the compressive strength (mainly due to the increase in geopolymer development) and are more likely to contribute to damping. It is a matter of curiosity about what kind of situation will emerge at the end of the day. This issue will be further investigated with XRD-based microstructural, modal-based dynamic, and static compressive strength-based mechanical tests and analyses.

#### 4. X-Ray Diffraction (XRD)-based Microstructural Analysis

This section will present X-Ray diffraction (XRD)-based analysis results for further microstructural evaluations. Figure 8 shows the XRD patterns of the A1.5-W0.5 and A3.5-W0.5 samples. These patterns were obtained by scanning the sample powders with X-rays. The selection of these two variants for XRD analysis is based on the same rationale as the SEM analysis described in the previous section. As seen in Figure 8, the XRD patterns of the GPC samples reveal a semi-crystalline structure (ranging from amorphous to semi-crystalline). These patterns and structural evaluations are consistent with other studies on low-calcium FA-based GPC samples [47-51]. In Figure 8, the highest intensity diffraction peaks correspond to quartz crystallites (a chemically and mechanically stable form of silicon dioxide,  $\text{SiO}_2$ ), marked at  $29.5^\circ 2\theta$ . Additionally, several other peaks related to different forms of silica are detected at  $21^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $41^\circ$ ,  $44^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $46^\circ$ , and  $51^\circ 2\theta$ . The second most abundant crystallite is mullite ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), observed at  $27^\circ$  and  $31^\circ 2\theta$ . These crystallites are also prominent in the SEM images presented earlier (Figures 4 and 5) and align with previous findings. These phase determinations highlight the characteristics of low-calcium FA-based GPC and match other similar studies in the literature [47, 48, 52]. The total intensities of the mullite phases primarily come from unreacted FA particles that either remained or dissolved and rearranged during polymerization. In contrast, the total intensities of the silica phases result from a combination of river sand, unreacted FA particles, and new crystallites formed during polymerization.



**Figure 8.** Comparison of the XRD patterns of A1.5-W0.5 and A3.5-W0.5 coded specimens.

For a better understanding of this subject, the components of each diffraction peak are described in Figure 8, and detailed interpretations by literature search are presented below:

Quartz and mullite crystallites are components of low-calcium FA and increase the crystallinity of FA-based GPC [47, 48]. However, because of their chemical stability, even if their intensities decrease with polymerization, some remain and do not react [47, 48]. These crystallites are demonstrated in Figure 8.

As reported in the literature [48, 50], newly- formed quartz phases (with stable tetrahedral structures) are observed if high-temperature curing is implemented, and these additional products contribute to compressive strength [48, 50]. These products and related phases are demonstrated in Figure 8.

Fine aggregates are used in the production of GPC. The river sand used in this study as fine aggregate is rich in Quartz crystallites [53, 54]. Hence, as seen in Figure 8, it has a considerable share in the quartz diffraction peak intensity of the XRD patterns, identified at  $29.5^\circ$  ( $2\theta$ ) for both variations.

Additionally, several peaks between  $25-50^\circ$  ( $2\theta$ ) are observed and determined as N-A-S-H or C-A-S-H. These phase determinations coincide with other similar studies in the literature [48, 50]. As stated in the literature, the major polymerization products and the main mechanical strength-providing elements of low-calcium FA-based GPC are the Sodium Aluminate Silicate Hydrate (N-A-S-H) gels [48, 55]. According to Fernández-Jiménez et al. [55], depending on the calcium content of FA, Calcium Aluminate Silicate Hydrate (C-A-S-H) gel products are also formed, albeit in much smaller amounts if low-calcium FA is used as the binder. These C-A-S-H products are also seen in OPC concrete and decrease the setting time of both concrete types [48].

The nature of the N-A-S-H and C-A-S-H gels depends on the type and dosage of the chemical activators [55] and increases with the polymerization degree [47, 48]. As seen in Figure 8, N-A-S-H or C-A-S-H phases were identified between  $25-50^\circ$  ( $2\theta$ ), and the diffraction peak intensities of A3.5-W0.5 were greater than A1.5-W0.5, indicating the reaction degree was better for this variation.

It is reported in the literature that SS activators promote the dissolution of solid crystallites (identified at  $21^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $31^\circ$ ,  $41^\circ$ ,  $44^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $46^\circ$  and  $51^\circ$  ( $2\theta$ ) for both of the variations), and bring them into polymerization [49]. As seen in Fig.8, most of the diffraction peak intensities of these phases are lower for the A3.5-W0.5 variation. On the other hand, the diffraction peak intensities of the N-A-S-H and C-A-S-H gels (identified between  $25-50^\circ$   $2\theta$ ) significantly enhanced. In other words, the solid contents in the A3.5-W0.5 dissolve higher, and more gel products are developed.

The above findings are consistent with the previously presented SEM image-based analyses and other XRD-based studies in the literature. However, like any other XRD-based microstructural analysis, these evaluations are hypothetical and require additional investigations. Therefore, this subject will be further investigated with modal-based dynamic and static compressive strength-based mechanical tests.

## 5. Modal Tests-based Dynamic Parameter Analysis

This section will present modal test and analysis results for experimental determination and evaluation of dynamic characteristic parameters. Figure 9 shows the modal test and analysis equipment used for these purposes in the previous study of the authors [33]. During these modal tests, a Dewe-43A-type USB DAQ system was used for the data acquisition. The analog sampling rate was selected as 10 kHz per channel. Produced GPC prism specimens (in Figure 3(a)) were placed on sufficiently soft urethane blocks, as suggested in the literature [56, 57], to provide a free vibrating condition. A compression-type Dytran 5800B2 model impulse hammer was used for the excitations. Each produced prism was divided into 33 equally distanced points. An IEPE shear type (MMF KS76C.100 model) accelerometer was mounted at each test specimen's corner point (33th point).

Each of the 33 points described above and shown in Figure 9 was excited five times with modal hammer strikes, and in the end, 165 FRF (frequency response spectrum) graphs were obtained for only a test specimen. After these, the resonance frequencies, damping ratios, and mode shape animations were obtained with the Dewesoft® Experimental Modal Analysis (EMA) software. During analysis, the mode indication functions (MIF) and modal circle methods are used in this study, as explained and suggested in the literature [58-60]. Figure 10 presents an example of resonance frequency and modal (viscous) damping ratio estimation. In this figure, MIF peak points near the value of one (1) indicate the resonance frequencies of the tested specimens [61], as values close to one in MIF graphs help identify the presence and frequency of resonance. Additionally, mode shape animations corresponding to each resonance frequency (first resonance, second resonance, etc.) are provided for easier understanding. Below the MIF graph in Figure 10, six modal circle analyses from one test specimen's endpoints are shown. The modal circles analysis method is one of the most common techniques for accurately determining damping ratios. The descriptions above these modal circles refer to the 'response point (33Z+)/excitation point (1Z+, etc.)' meanings.

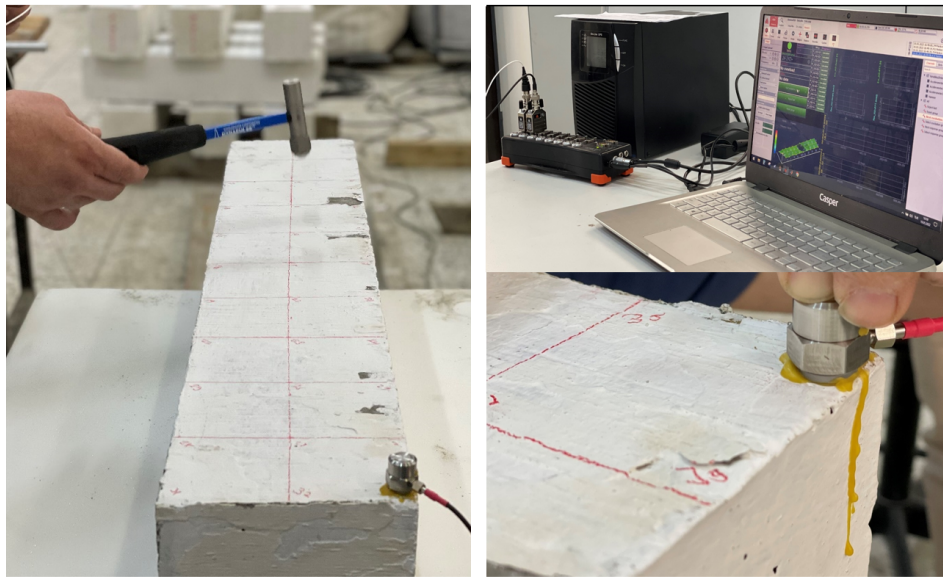


Figure 9. Produced 150x150x750 mm sized geopolymer concrete prisms and modal test setup [33].

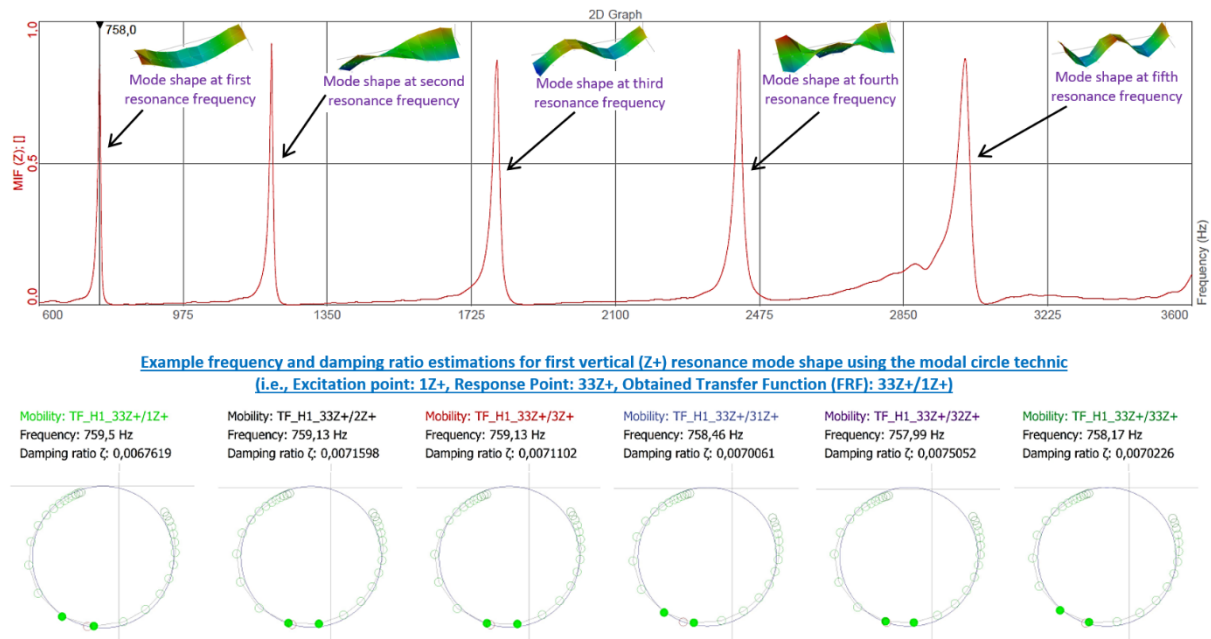


Figure 10. MIF graphs of an (A1.5-W0.7) test specimen (upper-side), and exact resonance frequency (Hz)-damping ratio (%) estimations using modal circle technique (down-side).

Table 3 summarizes the details of the obtained resonance frequencies, damping ratio values, and standard deviations. In the first column of Table 3, there are sample codes for which mix variation and component dosage ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) information were given in Table 2 previously. In the second column, the first resonance frequency calculation results are presented. These frequencies were obtained with numerical averaging of the six modal circle analysis results, previously exemplified in Figure 10. The standard deviations of these resonant frequency values are given in the 3rd column of Table 3. Thanks to the applied test and analysis techniques, the standard deviations in the resonance frequency determinations are less than 1 per thousand. In the 4th column of Table 3, similarly determined damping ratio averages are given, and in the 5th column, the standard deviations of these values are

given. These deviation values can be interpreted as a success for modal testing, a non-destructive testing (NDT) method. These deviation values are even equal to or below the destructive static strength test limits.

**Table 3.** Modal analysis results

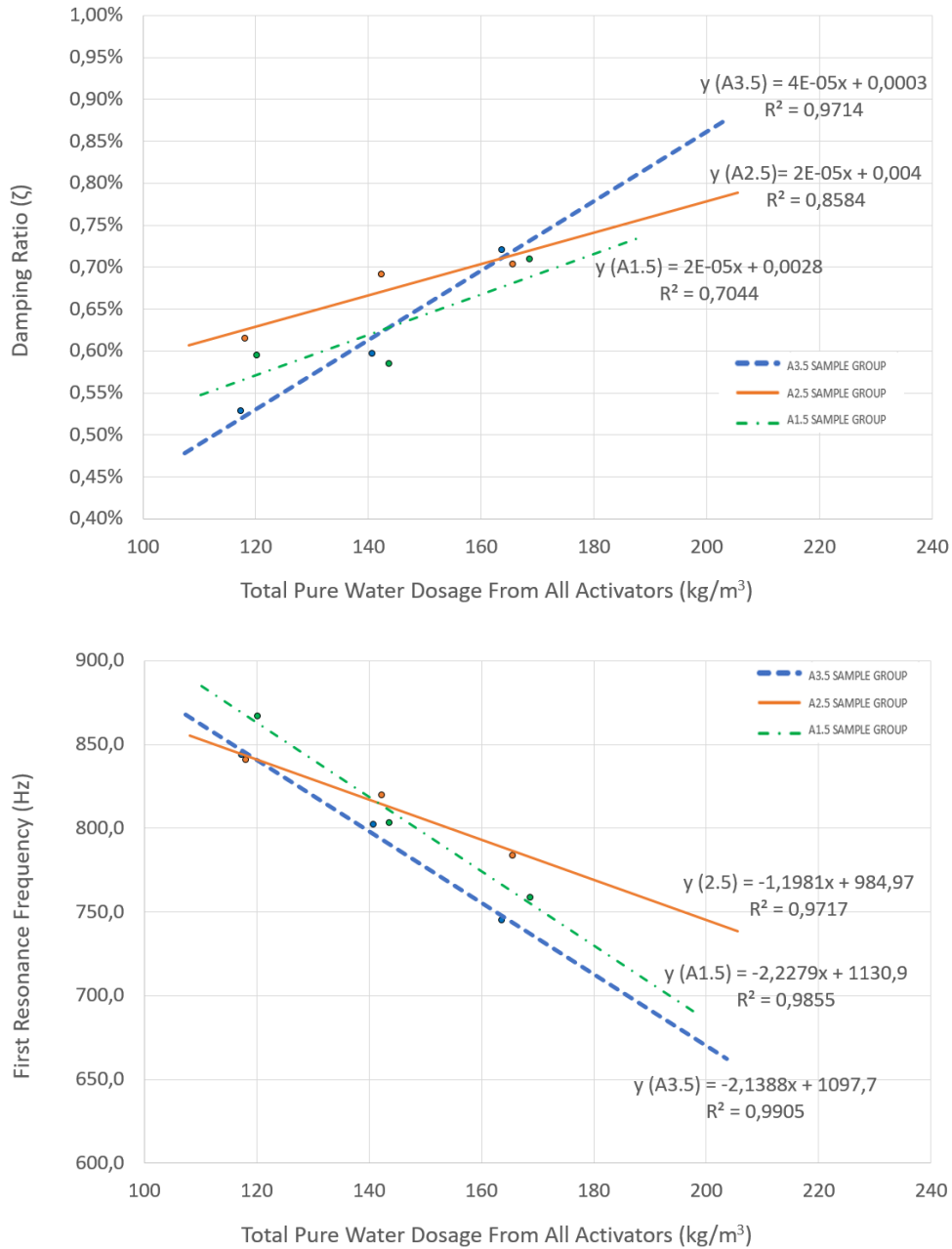
Variation Code	Average First Resonance Frequency (Hz)	Resonance Frequency Standard Deviation	Average First Damping Ratio ( $\zeta$ )	Damping Ratio Standard Deviation
A1.5-W0.5	866.8	0.02%	0.0059445	1.1%
A1.5-W0.6	803.2	0.03%	0.0058477	2.4%
A1.5-W0.7	758.7	0.07%	0.0070943	3.1%
A2.5-W0.5	840.7	0.06%	0.0061537	1.8%
A2.5-W0.6	820.0	0.04%	0.0069172	2.0%
A2.5-W0.7	783.7	0.08%	0.0070373	5.3%
A3.5-W0.5	843.9	0.02%	0.0052906	0.7%
A3.5-W0.6	802.3	0.05%	0.0059717	1.8%
A3.5-W0.7	744.9	0.09%	0.0072020	2.2%

Figure 11 shows the relationships between pure water dosage (PW), damping ratio, and resonance frequency. As stated in the literature [55] and deduced after previously presented XRD-based microstructural analysis, the nature of the N-A-S-H and C-A-S-H gels depends on the type and dosage of the chemical activators. Therefore, during the preparation of Figure 11, after testing many alternatives, it was concluded that “categorizing the produced GPC variations based on the A ratio of each variation” provides more meaningful results. As observed, the dynamic characteristics of GPC variations are closely linked to the water content (PW). Generally, increasing PW leads to higher damping ratios (a positive correlation) and lower resonance frequencies (a negative correlation). As mentioned earlier, this behavior in GPC is similar to that of OPC concrete [33]. While numerically comparing the dynamic performances of different concrete types is beyond the scope of this study, it is likely that the effect of PW is more pronounced in GPC. This is because, as noted in the literature, water is only minimally consumed during the geopolymerization process [62].

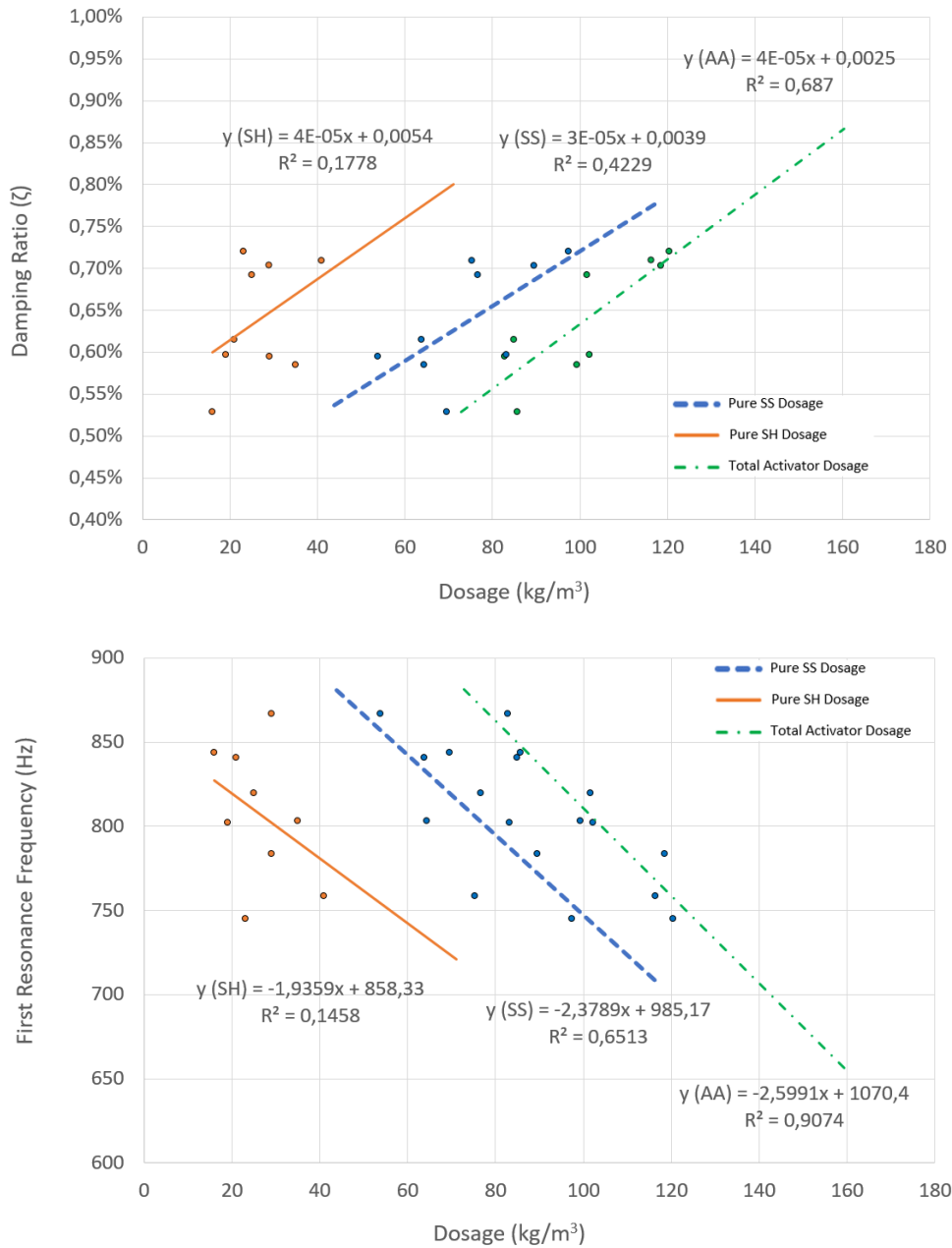
Another issue that must be investigated is that the liquid ingredients of GPC also contain chemical activators. Figure 12 shows the relationships between these chemical activators, damping ratio, and resonance frequency. During the preparation of this figure, the effects of pure sodium silicate (PSS), pure sodium hydroxide (PSH), and the sum of these activators (PA) were investigated separately. As deduced from Figure 12, increasing these parameters has an increasing effect on modal damping ratios (positive correlation) and decreasing effect on resonance frequencies (negative correlation).

After these, the linear regression coefficients of determination ( $R^2$ ) values, calculated and presented in Figures 11 and 12, will be evaluated. As deduced from these figures, the resonance frequencies show a stronger correlation than the damping ratios. It is undeniable that the damping ratios of structures composed of heterogeneous materials like GPC or OPC concrete may differ somewhat throughout the entire cross-section. Conversely, every resonant frequency across the cross-section should remain consistent [33]. Therefore, during analysis, all sections of a specimen are expected to vibrate at uniform frequencies, except at nodal points. However, the test samples in question do not have a homogeneous structure with the same mass and modulus of elasticity at every location. On the other hand, some excitations may coincide near or on the aggregate grains. So, it is impossible to talk about precise damping ratio detection throughout the entire section. This deviation during modal damping estimations is also more or less valid for other mechanical and microstructural tests and analyses. However, utilizing several advanced modal analysis techniques, the maximum deviation value was kept chiefly below 5%, preventing further increases due to test and analysis imperfections. These slight deviations obtained by non-destructive (NDT) modal tests are even lower than the standard deviation levels commonly accepted for static concrete strength tests. When continuing these analyses, it can be deduced from Figure 11 that the PW dosage showed a strong correlation. On the other hand, in Figure 12, the SS dosage has a higher correlation with the modal parameters than the SH dosage. It is a fact that the effect of liquid ingredients (chemical activators and water) is more complex for GPC compared to OPC concrete. Because as the liquid activator solution dosages of the GPC (SS and SH) increase, the increasing pure chemical contents (PSS and PSH) promote more geopolymer development. At the same time, increasing pure water content (PW) increases porosity.





**Figure 11.** Effect of the pure water dosage (PW) on the modal parameters (damping ratio (upper-side) and resonance frequency (down-side)) of specimens categorized into the A ratio groups.



**Figure 12.** Effect of the pure activator dosages on the modal parameters (damping ratio (upper-side) and resonance frequency (down-side)) of specimens.

### 6. Static Compressive Strength Tests- Based Analysis

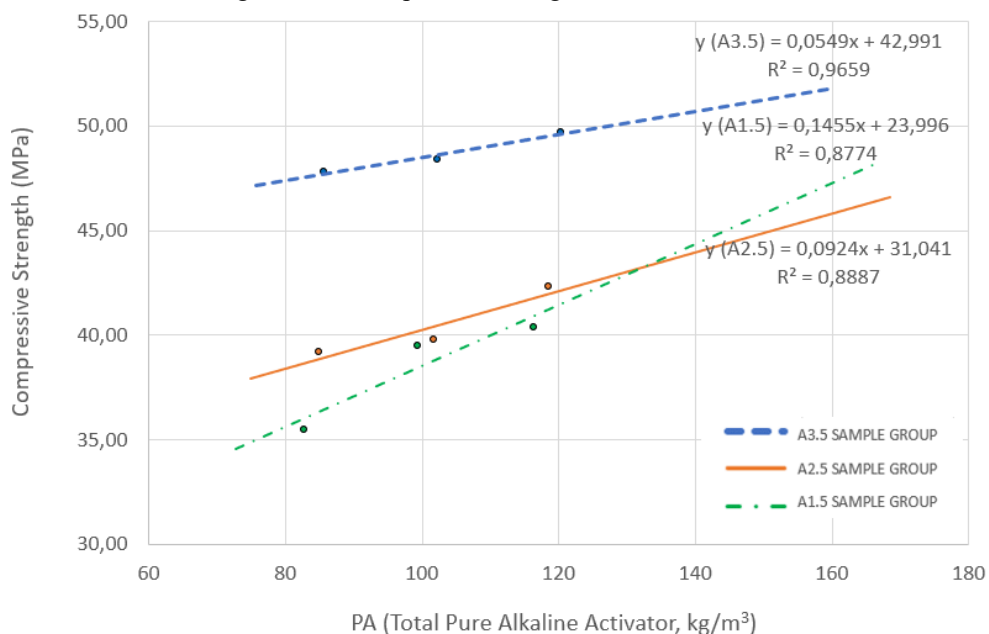
This section will present experimental mechanical test results for determining and evaluating the static compressive strength characteristics of the produced GPC variations. For these purposes, the 150x150x750 mm sized prisms (in Figure 3(a)) previously used for modal tests were cut into cubes of 15 cm (in Figure 3(b)) and subjected to compressive strength tests. Figure 13 shows the results of these tests, with the previously presented modal analysis results. Depending on their placement in the appropriate column and category, bar graphs in this image illustrate the numerical values in each line. In Figure 13, GPC variations have been subjected to the “A ratio-based categorization.” Because as stated in the literature [55] and deduced after previously presented XRD-based microstructural analysis and experimental modal analysis, the nature of the N-A-S-H and C-A-S-H gels

depends on the type and dosage of the chemical activators. Therefore, during the preparation of Figure 13, after testing many alternatives, it was concluded that investigating the produced GPC variations based on the A ratio provides more meaningful results.

Variation Code	A Ratio Category	Average Compressive Strength (MPa)	Average First Resonance Frequency (Hz)	Average First Damping Ratio ( $\zeta$ )
A1.5-W0.5	1.5	35,5	866,8	0,005945
A1.5-W0.6	1.5	39,5	803,2	0,005848
A1.5-W0.7	1.5	40,4	758,7	0,007094
A2.5-W0.5	2.5	39,2	840,7	0,006154
A2.5-W0.6	2.5	39,8	820,0	0,006917
A2.5-W0.7	2.5	42,3	783,7	0,007037
A3.5-W0.5	3.5	47,8	843,9	0,005291
A3.5-W0.6	3.5	48,4	802,3	0,005972
A3.5-W0.7	3.5	49,7	744,9	0,007202

**Figure 13.** Demonstration of the static compressive strength and dynamic (modal) parameters of the produced variations using bar graphs.

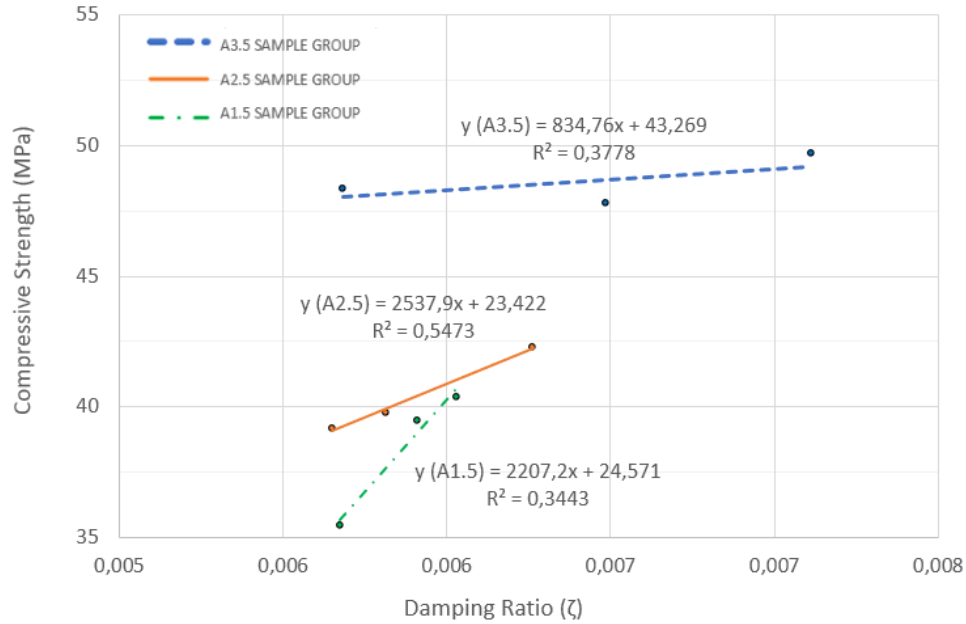
Figure 14 shows the relationships between the total pure alkaline activator dosage from all chemical solutions (PA) and compressive strengths. During the preparation of this figure, as previously deduced, the “A ratio-based categorization method” was used. Coupled with the findings of Figure 13, it can be concluded that increasing the A ratio and PA has an increasing effect on compressive strength values.



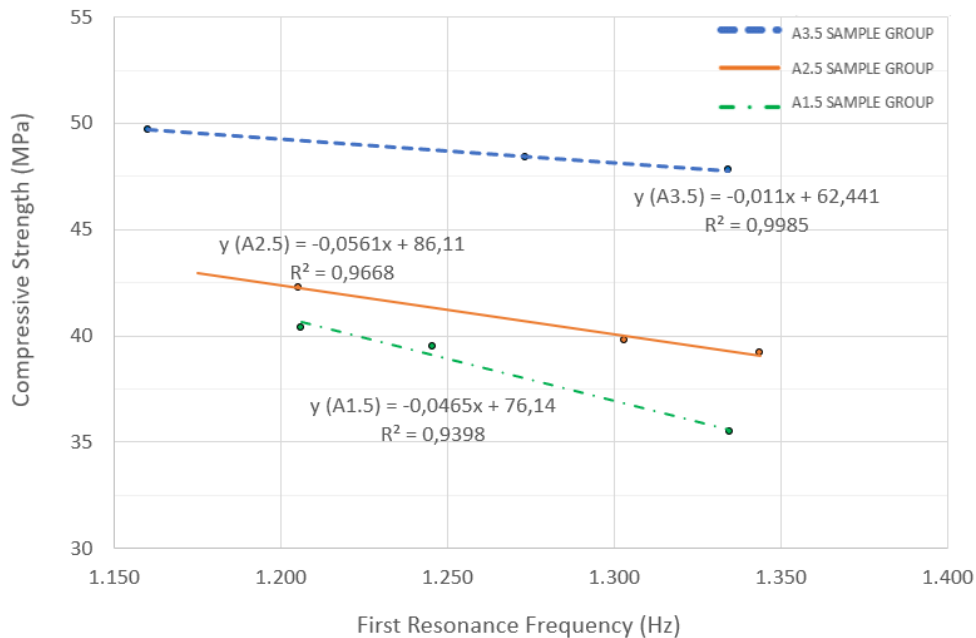
**Figure 14.** Effect of the PA dosages on the strengths of specimens categorized into the A ratio groups.

Figures 15 and 16 show the relationships between the dynamic and static characteristic parameters obtained at the end of all these tests and analyses. During the preparation of these figures, as previously deduced, the “A ratio-based categorization method” was used. When comparing the regression coefficient of determination ( $R^2$ ) values, the resonance frequencies show a stronger relationship than the damping ratios. The reasons were explained

in detail in the fifth section. The heterogeneity of GPC specimens seems to affect the damping and static strength more than the resonance frequency characteristics. This prediction is logical since a test sample under vibration should all oscillate with the same resonance frequencies except for its nodal points. However, since the specimens in question do not have a homogeneous structure at every location, it is nearly impossible to talk about the same microstructure, damping ratio, or compressive strength detection throughout the entire section.



**Figure 15.** Compressive strength and damping ratio relationships.



**Figure 16.** Compressive strength and resonance frequency relationships.

To sum up, most buildings and structures inevitably experience dynamic loadings today. Therefore, the dynamic characteristics and damping behaviors of structural materials are, at least, just as important as their static capacities. Hence, today, engineers need co-currently increase the dynamic damping ratios and static compressive strengths of concrete materials. However, as concluded from the presented literature review, as the static strength

of OPC concrete increases, its dynamic damping ratio generally decreases. Today, the co-currently increasing dynamic damping ratio and static compressive strength of OPC concrete material are still challenges to overcome. These comparisons are made based on the reciprocal changing behaviors of static and dynamic performances. Numerically comparing the dynamic performances and enhancement methods of OPC concrete with other concrete types, i.e., geopolymer concrete, is excluded from the scope of this study. Because it is more reasonable to say that geopolymer concrete and OPC concrete are made using fairly different procedures and that both materials have unique and specific dynamic performance enhancing strategies, as mentioned by the authors in a prior study [26].

Several investigations on OPC concrete demonstrate that an increased water/cement ratio results in a reduction in strength but an increase in damping ratio [14, 63]. It is valid for both; GPC and OPC concrete; a porous structure (water-filled or empty voids) causes an increase in the damping ratios. Dynamic stress waves undergo more refraction and damping in these porous structures. But the decisive factor for the mechanical strengths is when the liquid content in both of these materials (GPC and OPC concrete) increases, while a porous formation that negatively affects the strength occurs in OPC; in GPC, this porosity develops in a way that does not adversely affect the mechanical strength [64]. Or it can be expressed as follows, the increase in strength due to the increase in geopolymer development is at a level that can prevent the strength from decreasing due to the additional porous structure. As deduced from the presented test and analysis results, in the studied analysis range, as the static compressive strength values increase, generally, the damping ratios increase (positive correlation), and the resonance frequencies decrease (negative correlation). This behavior should be noted as an essential difference distinguishing GPC from OPC concrete. However, the SS activator's regression coefficients of determination were considerably higher than the SH's. In this sense, if the pure sodium silicate dosages (PSS) of the designed specimens are increased from 55 kg/m<sup>3</sup> to 98 kg/m<sup>3</sup> gradually, the damping ratios increase continuously and show a percentage increase of 17% in the final dosage (seen in Figure 12). Under the same conditions, resonance frequencies show a 12% reduction (seen in Figure 12). At an exciting point, under the same conditions, the compressive strength values also increase in parallel with the damping ratio. This percentage increase reaches 39% in the final dosage (seen in Figures 15 and 16).

## 7. Conclusions and Future Prospects

This study investigates the co-relationship between the damping and compressive strength of heat-cured low-calcium fly ash-based geopolymer concrete (GPC) variations produced with variable sodium silicate (SS) and hydroxide (SH) activators. According to the modal, mechanical, and microstructural tests and analyses, the following findings have been obtained:

- According to the modal test and analysis results, the damping ratios of specimens generally increase with the increase of the SS and SH dosages. However, the SS activator's regression coefficients of determination were considerably higher than the SH's.
- According to the SEM image and XRD-based microstructure analysis, the fly ash (FA) particles dissolve and react more as the chemical activators increase. A specific porosity is observed. The dynamic stress waves are predicted to undergo more refraction and damping because of the specific porous structure mentioned above. In this aspect, the SS activator showed a higher effect and stronger correlation than the SH.
- According to the compressive strength test results, despite the mentioned specific porous structure, surprisingly, strength values also co-currently increase with the increase of the SS and SH dosages.
- Coupled with the modal test and analysis results, positive correlations between the static compressive strength and dynamic damping ratio were determined for the variable pure sodium hydroxide (PSH) and pure sodium silicate (PSS) dosages. In this aspect, the PSS values showed a higher effect and stronger correlation than the PSH.
- In ordinary Portland cement (OPC) concretes, a higher water/cement ratio increases damping but reduces strength. In GPC, more water from liquid activators increases porosity. However, it also increases the PSS and hence the degree of polymerisation. Eventually, as the strength improves enough to offset the negative effects of increased porosity, both damping and strength values increase together.
- The R<sup>2</sup> values in Figures 11, 12, 15 and 16 show that resonant frequencies have a stronger correlation with dynamic and static characteristic parameters than damping ratios. This is because heterogeneity in materials such as GPC or OPC concrete affects damping and static strength more than resonant frequency properties. While resonant frequencies remain consistent across the cross section, variations in microstructure, damping ratios and compressive strength are inevitable.

- As the PSS dosage increased from 55 kg/m<sup>3</sup> to 98 kg/m<sup>3</sup>, the modal damping ratios increased steadily, reaching a 17% increase at the final dosage. In contrast, the resonant frequencies, which showed a stronger correlation, decreased by 12%. Interestingly, the compressive strength also increased with the damping ratio, with a final percentage increase of 39%.

These presented findings are expected to be beneficial for engineers and researchers. With these analyses, the benefits of appropriately and eco-effectively using this newly developed material are better revealed, and its widespread use is encouraged. It would be advantageous to carry out more research on the topic using other kinds of geopolymer concrete and a wider variety of mixing ratios.

## Acknowledgments

This work was supported by the TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) [grant number 121M236, 2021]. We would like to thank the officials of ME-KA Ltd. Co. and the researchers involved in the project for their contributions to the study. All authors worked together in a collaborative effort, contributing to the execution of the experiments, as well as the writing and interpretation of the manuscript.

## References

- [1] Remennikov AM, Kaewunruen S. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. *Struct Control Health Monit* 2008; 15(2): 207-234.
- [2] Cui Y, Hao H, Li J, Chen W. Effect of adding methylcellulose on mechanical and vibration properties of geopolymer paste and hybrid fiber-reinforced geopolymer composite. *J Mater Civ Eng* 2020; 32(7): 04020166.
- [3] Ou J, Liu T, Li J. Dynamic and seismic property experiments of high damping concrete and its frame models. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed* 2008; 23(1): 1-6.
- [4] Shah AA, Ribakov Y. Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Mater Des* 2011; 32(8-9): 4122-4151.
- [5] Hadi MNS, Li J. External reinforcement of high strength concrete columns. *Compos Struct* 2004; 65(3-4): 279-287.
- [6] Tayeh BA, Bakar BA, Johari MM, Voo YL. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. *Constr Build Mater* 2012; 36: 538-548.
- [7] Salman MM, Al-Amawee AH. The ratio between static and dynamic modulus of elasticity in normal and high strength concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 2006; 10(2): 163-174.
- [8] Alexa-Stratulat SM, Mihai P, Toma AM, Taranu G, Toma IO. Influence of Concrete Strength Class on the Long-Term Static and Dynamic Elastic Moduli of Concrete. *Applied Sciences* 2021; 11(24): 11671.
- [9] Zahid MM, Bakar BA, Nazri FM, Ab Rahim MA. A review on raw materials and curing methods applied in production of ultra high performance concrete. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020; p. 012202.
- [10] Ferdous W, Manalo A, Van Erp G, Aravinthan T, Kaewunruen S, Remennikov A. Composite railway sleepers—Recent developments, challenges and future prospects. *Compos Struct* 2015; 134: 158-168.
- [11] Aktaş B, Cecen F, Öztürk H, Navdar MB, Öztürk İŞ. Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis. *Eng Fail Anal* 2022; 131: 105821.
- [12] Lu JX, Shen P, Ali HA, Poon CS. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Mater Des* 2022; 216: 110553.
- [13] Liang C, Liu T, Xiao J, Zou D, Yang Q. The damping property of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2016; 102: 834-842.
- [14] Tian Y, Shi S, Jia K, Hu S. Mechanical and dynamic properties of high strength concrete modified with lightweight aggregates presaturated polymer emulsion. *Constr Build Mater* 2015; 93: 1151-1156.
- [15] Zeitouni AI, Rizos DC, Qian Y. Benefits of high strength reduced modulus (HSRM) concrete railroad ties under center binding support conditions. *Constr Build Mater* 2018; 192: 210-223.
- [16] Giner VT, Baeza FJ, Ivorra S, Zornoza E, Galao Ó. Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume. *Mater Des* 2012; 34: 332-339.
- [17] Fu X, Chung DD. Vibration damping admixtures for cement. *Cem Concr Res* 1996; 26(1): 69-75.
- [18] Meesit R, Kaewunruen S. Vibration characteristics of micro-engineered crumb rubber concrete for railway sleeper applications. *J Adv Concr Technol* 2017; 15(2): 55-66.
- [19] Sukontasukkul P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Constr Build Mater* 2009; 23(2): 1084-1092.
- [20] Zhou C, Pei X, Li W, Liu Y. Mechanical and damping properties of recycled aggregate concrete modified with air-entraining agent and polypropylene fiber. *Materials* 2020; 13(8): 2004.
- [21] Giner VT, Ivorra S, Baeza FJ, Zornoza E, Ferrer B. Silica fume admixture effect on the dynamic properties of concrete. *Constr Build Mater* 2011; 25(8): 3272-3277.
- [22] Warburton GB. *The Dynamical Behaviour of Structures*. 2nd Edition. New York: PERGAMON PRESS OXFORD, ISBN: 9781483187785, 1976.

- [23] Swamy N, Rigby G. Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et construction* 1971; 4: 13-40.
- [24] Salzmann, A. Damping characteristics of reinforced and prestressed normal-and high-strength concrete beams. Griffith University, 2003.
- [25] Eiras JN, Popovics JS, Borrachero MV, Monzó J, Payá J. The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods. *Constr Build Mater* 2015; 94: 565-571.
- [26] Provis JL, Brice DG, Buchwald A, Duxson P, Kavalerova E, Krivenko PV, Wiercx JALM. Demonstration projects and applications in building and civil infrastructure. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM* 2014; 309-338.
- [27] Amran YM, Alyousef R, Alabduljabbar H, El-Zeadani M. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Cleaner Prod* 2020; 251: 119679.
- [28] Bondar, D. Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials. In: *Proceedings of the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (ICSCMT) 2013*; 18-21.
- [29] Guo X, Shi H, Dick WA. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos* 2010; 32(2): 142-147.
- [30] Khan MZN, Hao Y, Hao H, Shaikh FUA. Mechanical properties of ambient cured high strength hybrid steel and synthetic fibers reinforced geopolymer composites. *Cem Concr Compos* 2018; 85: 133-152.
- [31] Pan Z, Feng KN, Gong K, Zou B, Korayem AH, Sanjayan J, Collins F. Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers. *J Mater Sci* 2013; 48: 3128-3137.
- [32] Özbayrak A, Kucukgoncu H, Atas O, Aslanbay HH, Aslanbay YG, Altun F. Determination of stress-strain relationship based on alkali activator ratios in geopolymer concretes and development of empirical formulations. *Structures* 2023; 2048-2061.
- [33] Cecen F, Özbayrak A, Aktaş B. Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations. *Cem Concr Compos* 2023; 137: 104951.
- [34] Okoye FN, Durgaprasad J, Singh NB. Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceram Int* 2016; 42(2): 3000-3006.
- [35] Farooq F, Jin X, Javed MF, Akbar A, Shah MI, Aslam F, Alyousef R. Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Constr. Build. Mater.* 2021; 306: 124762.
- [36] Gupta P, Nagpal G, Gupta N. Fly ash-based geopolymers: an emerging sustainable solution for heavy metal remediation from aqueous medium. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 2021; 10(1): 89.
- [37] Temuujin J, Minjigmaa A, Bayarzul U, Kim DS, Lee SH, Lee HJ, MacKenzie KJD. Properties of geopolymer binders prepared from milled pond ash. *Materiales de Construccion* 2017; 67(328): 134.
- [38] Acar MC, Şener A, Özbayrak A, Çelik Aİ. Geopolimer Harçlarda Zeolit Katkısının Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2020; 8(3): 820-832.
- [39] Bernal SA, Provis JL. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives. *J Am Ceram Soc* 2014; 97(4): 997-1008.
- [40] Adak D, Mandal S. Strength and durability performance of fly ash-based process-modified geopolymer concrete. *J Mater Civ Eng* 2019; 31(9): 04019174.
- [41] Özbayrak A, Kucukgoncu H, Aslanbay HH, Aslanbay YG, Atas O. Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios, *J Build Eng* 2023; 68: 106108.
- [42] Luna-Galiano Y, Fernández-Pereira C, Izquierdo M. Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength. *Mater Constr* 2016; 66(324): 098.
- [43] Ma Y, Hu J, Ye G. The effect of activating solution on the mechanical strength, reaction rate, mineralogy, and microstructure of alkali-activated fly ash. *J Mater Sci* 2012; 47: 4568-4578.
- [44] Brough AR, Atkinson A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cem Concr Res* 2002; 32(6): 865-879.
- [45] Çelik Aİ, Tunç U, Bahrami A, Karalar M, Mydin MAO, Alomayri T, Özkılıç YO. Use of waste glass powder toward more sustainable geopolymer concrete. *J Mater Res Technol* 2023; 24: 8533-8546.
- [46] Özkılıç YO, Çelik Aİ, Tunç U, Karalar M, Deifalla A, Alomayri T, Althoey F. The use of crushed recycled glass for alkali activated fly ash based geopolymer concrete and prediction of its capacity. *J Mater Res Technol* 2023; 24: 8267-8281.
- [47] Huang W, Wang H. Geopolymer pervious concrete modified with granulated blast furnace slag: Microscale characterization and mechanical strength. *J Cleaner Prod* 2021; 328: 129469.
- [48] Xiao R, Ma Y, Jiang X, Zhang M, Zhang Y, Wang Y, He Q. Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental impacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature. *J Cleaner Prod* 2020; 252: 119610.
- [49] Huo W, Zhu Z, Sun H, Gao Q, Zhang J, Wan Y, Zhang C. Reaction kinetics, mechanical properties, and microstructure of nano-modified recycled concrete fine powder/slag based geopolymers. *J Cleaner Prod* 2022; 372: 133715.
- [50] Zhang Y, Xiao R, Jiang X, Li W, Zhu X, Huang B. Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. *J Cleaner Prod* 2020; 273: 122970.

- [51] Zhang Y, Xiao R, Jiang X, Li W, Zhu X, Huang B. Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. *J Cleaner Prod* 2020; 273: 122970.
- [52] Han G, Yang S, Peng W, Huang Y, Wu H, Chai W, Liu J. Enhanced recycling and utilization of mullite from coal fly ash with a flotation and metallurgy process. *J Cleaner Prod* 2018; 178: 804-813.
- [53] Xu W, Wen X, Wei J, Xu P, Zhang B, Yu Q, Ma H. Feasibility of kaolin tailing sand to be as an environmentally friendly alternative to river sand in construction applications. *J Cleaner Prod* 2018; 205: 1114-1126.
- [54] Zhou N, Zhang J, Ouyang S, Deng X, Dong C, Du E. Feasibility study and performance optimization of sand-based cemented paste backfill materials. *J Cleaner Prod* 2020; 259: 120798.
- [55] Fernández-Jiménez A, Palomo A, Criado M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cem Concr Res* 2005; 35(6): 1204-1209.
- [56] Çeçen F, Aktaş B. Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers. *Eng. Fail. Anal.* 2021; 127: 105471.
- [57] Aktaş B, Cecen F, Öztürk H, Navdar MB, Öztürk İŞ. Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis. *Eng Fail Anal* 2022; 131: 105821.
- [58] Gjelstrup SL. What is modal analysis: the ultimate guide. DEWESoft, Available: <https://dewesoft.com/daq/what-is-modal-analysis>. [Accessed 11 06 2022], 2021.
- [59] Irretier HD. History and development of frequency domain methods in experimental modal analysis. *J Phys* 2002; 12(11): 11-91.
- [60] Avitabile P. Modal space-in our own little world. *Exp Tech* 2013; 37: 4-6.
- [61] Modal Test and Modal Analysis, <https://training.dewesoft.com/online/course/modal-testing-frf#mode-indicator-function-mif>, Accessed 14.09.2024
- [62] Šmilauer V, Hlaváček P, Škvára F, Šulc R, Kopecký L, Němeček J. Micromechanical multiscale model for alkali activation of fly ash and metakaolin. *J Mater Sci* 2011; 46: 6545-6555.
- [63] Tian Y, Lu D, Zhou J, Yang Y, Wang Z. Damping property of cement mortar incorporating damping aggregate. *Materials* 2020; 13(3): 792.
- [64] Aslanbay YG, Aslanbay HH, Özbayrak A, Kucukgoncu H, Atas O. Comprehensive analysis of experimental and numerical results of bond strength and mechanical properties of fly ash based GPC and OPC concrete. *Constr Build Mater* 2024; 416: 135175.





## Hisse Senedi Fiyatlarının LSTM ve ARIMA Modelleri Kullanılarak Tahmin Edilmesi

Yıldız AYDIN<sup>1\*</sup>, Gizem VAROL<sup>2</sup>, Eyyüb Ensari GÖKDENİZ<sup>3</sup>, Hakan MANUS<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Gelişim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>yaydin@gelisim.edu.tr, <sup>2</sup>gizemvaroll@gmail.com, <sup>3</sup>200326141@ogr.gelisim.edu.tr, <sup>4</sup>200326059@ogr.gelisim.edu.tr

(Geliş/Received: 11/06/2024;

Kabul/Accepted: 24/09/2024)

**Öz:** Borsa İstanbul'da işlem gören hisse senedi piyasası, günümüzde en çok rağbet gören yatırım araçlarından biridir. Öyle ki nüfusa göre en çok işlem gerçekleştirilen ilk beş ülkeden biri Türkiye'dir. Teknolojinin gelişimi, yatırımcıların bu gibi yatırım araçlarına yönelmesini kolaylaştırmasının yanı sıra analiz yöntemlerini de kolaylaştırmıştır. Bu çalışma, kullanılan analiz yöntemlerinden olan LSTM ve ARIMA modellerini karşılaştırıp, hangisinin daha iyi performans sağladığını görmek için yapılmıştır. Çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak 2020-2024 yılları arasındaki verilerle gerçekleştirilmiş ve sektörel farklılıklar göz önünde bulundurularak işlem yapılmıştır. Sonuçlar, LSTM'nin karmaşık ve uzun vadeli bağımlılıkları yakalamada daha etkili olduğunu göstermiştir. Bu, yatırımcıların model seçimini yaparken daha bilinçli kararlar almasına yardımcı olacaktır.

**Anahtar kelimeler:** BIST, Otopregresif Entegre Hareketli Ortalama, Uzun-Kısa Süreli Bellek Modeli, LSTM, ARIMA.

### Forecasting Stock Prices Using LSTM and ARIMA Models

**Abstract:** The stock market traded on Borsa İstanbul is one of the most popular investment instruments today. In fact, Turkey is one of the top five countries with the highest number of transactions per capita. The development of technology has not only made it easier for investors to turn to such investment instruments but also facilitated the analysis methods. This study aims to compare the LSTM and ARIMA models, which are among the analysis methods used, to see which one provides better performance. Unlike other studies, this study was conducted using data from the years 2020-2024 and took sectoral differences into consideration. The results showed that LSTM is more effective in capturing complex and long-term dependencies. This will help investors make more informed decisions when choosing a model.

**Key words:** BIST, Autoregressive Integrated Moving Average, Long Short-Term Memory Model, LSTM, ARIMA.

### 1. Giriş

Borsa İstanbul (BİST), Türkiye'deki sermaye piyasası araçlarının, kambiyo ve kıymetli madenler ile taşların, SPK'nın (Sermaye Piyasası Kurulu) uygun gördüğü diğer sözleşme, belge ve kıymetlere yönelik alım satım emirlerinin toplanıp eşleştirildiği, işlemler sonucunda oluşan fiyatların tespit ve ilan edildiği pazar yeridir [1]. BİST30, Borsa İstanbul'da işlem gören hem işlem hacmi hem de piyasa değeri en yüksek 30 şirketin hisse senetlerinin performanslarının ölçülmesiyle meydana gelen bir endekstir. Borsa, ülkemizde yaşanan ekonomik sorunların sonucunda pek çok yatırımcının odak noktası haline gelmiş, yatırımcı sayısını artırarak ilerlemiştir. Bu sebeple borsa analizi değer kazanmış ve yatırımcılar için ilgi çekici bir konu olmuştur. Borsa analizi, geçmiş ve güncel piyasa verilerini kullanarak gelecekteki hisse senedi fiyatlarını ve piyasa trendlerini tahmin etme işlemidir. Bu analiz, yatırımcılara bilinçli yatırım kararları vermelerine yardımcı olmak için çeşitli teknikler ve yöntemler kullanır. Borsa analizi için temel ve teknik analiz olmak üzere iki yöntem ele alınır. Temel analiz, bir şirketin içsel değerini belirlemek için kullanılan bir yatırım yöntemidir. Bu analiz, şirketin mali durumunu, sektördeki konumunu, büyüme potansiyelini ve diğer faktörleri inceler. Teknik analiz, fiyat hareketlerini ve grafikleri inceleyerek yatırım kararları vermeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu analiz, trendleri, destek ve direnç seviyelerini ve momentumu belirlemek için kullanılır. Teknik analiz, çoğu zaman kısa vadeli hisse senedi davranışını anlamak için kullanılırken, uzun vadeli tahminler için temel analiz kullanılır [2]. Bu yöntemler yatırımcıların zararını minimum ölçüde tutabilmek ve yatırımlarının tutarlılığını artırabilmek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amacı, BİST30 içerisinde bulunan hisselerin verilerini zaman serisi tahmini için kullanılan ve doğrusal bir model olan ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average - Otopregresif Entegre Hareketli Ortalama) [3] ile yapay sinir ağlarına dayalı bir derin öğrenme modeli olan LSTM (Long Short-Term Memory - Uzun Kısa Dönemli Bellek) [4] modelini kullanarak kısa vadeli fiyat tahminleri elde etmek ve bu iki modeli karşılaştırmaktır. ARIMA

\* Sorumlu yazar: [gizemvaroll@gmail.com](mailto:gizemvaroll@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9061-0109, <sup>2</sup> 0000-0002-2385-2586, <sup>3</sup> 0009-0009-5928-8532, <sup>4</sup> 0009-0002-4946-8168

ve LSTM geçmişte farklı çalışmalarda hem karşılaştırma hem de analiz amacıyla kullanılmıştır [5]. Değişken ekonomik gelişmelerin sonucunda artan finansal faaliyetler ve bu faaliyetlerin karmaşık bir hal alması, hisse senedi gibi birden fazla faktöre bağlı yatırım araçlarını da etkileyen bir durum olduğundan, bu çalışma da BİST30 verileri kullanılmıştır.

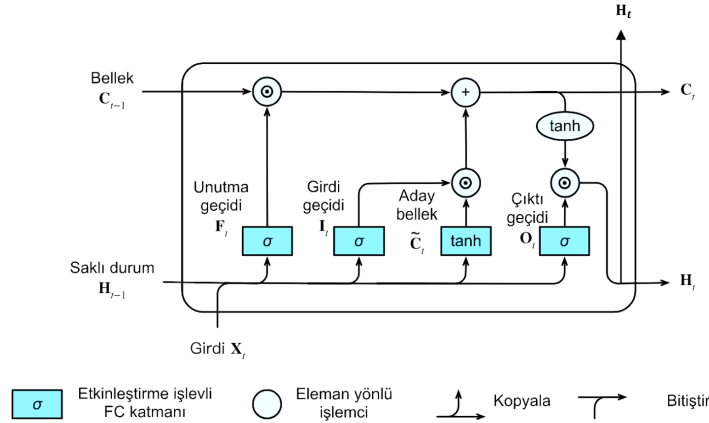
Literatürde Namin ve Namin [6], ekonomik ve finansal zaman serilerinin tahmininde ARIMA ve LSTM modellerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, ARIMA modelinin geleneksel bir zaman serisi tahmin yöntemi olarak doğruluğu ve hassasiyetiyle tanındığı, ancak derin öğrenme tabanlı yeni algoritmaların, özellikle Long Short-Term Memory (LSTM) algoritmasının, bu geleneksel yöntemlere göre üstün performans sergileyip sergilemediği araştırılmıştır. Araştırma bulguları, LSTM modelinin hata oranlarını %84 ile %87 oranında azalttığını ve bu nedenle ARIMA modeline kıyasla daha üstün olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çalışmada LSTM modelinin eğitim süresi sayısının (epoch) model performansı üzerinde rastgele bir etki yaptığı ve belirli bir desen izlemediği gözlemlenmiştir. Tanışman, Karcıoğlu, Uğur ve Bulut [7], bitcoin fiyatının tahmininde LSTM sinir ağı ve ARIMA zaman serisi modellerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, çok değişkenli LSTM sinir ağı modeli ve klasik ARIMA zaman serisi modeli kullanılarak Bitcoin'in gelecek değerinin tahmini yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, LSTM modelinin yakın ve uzak gelecekte düşük hata oranı ile tahmin performansı sergilediği, ARIMA modelinin ise sadece yakın gelecek için düşük hata oranı ile tahmin yaptığı tespit edilmiştir. Albayrak ve Saran [8], Borsa İstanbul verilerini kullanarak hisse senedi fiyatlarının tahmininde ARIMA, LSTM, GRU ve dikkat katmanlı LSTM modellerini karşılaştırmıştır. Çalışma, ARIMA modelinin diğer derin öğrenme tabanlı modellerle karşılaştırıldığında daha yüksek hata oranına sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, GRU modelinin en iyi performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Çalışma, ARIMA, LSTM ve GRU modellerinin hisse senedi tahminlerindeki performansını değerlendirmiştir. Eyllasov ve Çiçek [9], kripto para getirilerinin tahmininde ARIMA-GARCH ve LSTM yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, Bitcoin, Ethereum ve Binance Coin gibi kripto paraların getirileri, geleneksel zaman serisi modellerinden biri olan ARIMA-GARCH modeli ile derin öğrenme tabanlı bir yöntem olan LSTM ile tahmin edilmiştir. Araştırma sonuçları, Bitcoin için ARIMA-GARCH modelinin eğitim verilerinde daha iyi sonuçlar verdiğini, test verilerinde ise LSTM modelinin üstün performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, Binance Coin'de hem eğitim hem de test verileri için LSTM modelinin daha başarılı olduğu, Ethereum'da ise ARIMA-GARCH modelinin her iki veri setinde de daha iyi sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Bu çalışma da, kripto para piyasalarında kullanılan iki farklı yöntem arasındaki performans farklarını ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan veriler, BİST30'a dahil olan THYAO (Türk Hava Yolları-Ulaştırma Hizmetleri), AKBNK (Akbank-Bankacılık Hizmetleri), KCHOL (Koç Holding-Yatırım Şirketleri) ve KRDMMD (Kardemir-Metaller ve Madencilik) hisse senetlerinin 24.04.2020 tarihi ile 24.04.2024 tarihi arasında günlük kapanış verilerini içermektedir. Bu hisse senetlerinin de ele alınmasının sebebi her firmanın sektör ve yönetim alanlarında farklılık göstermesidir. Seçili senetler Borsa İstanbul'da yüksek işlem hacmine sahip olup, piyasa likiditesi ve yatırımcı ilgisi açısından önemli göstergelerdir. Bu, modellerin sonuçlarının güvenilirliğini artırmakta ve piyasadaki genel eğilimleri daha iyi temsil etmektedir. Bahsi geçen hisse senetlerine ait veriler Yahoo Finance [10] üzerinden elde edilmiş olup, Jupyter Notebook ortamında Python programlama dili ile işlenmiştir. Bu çalışmada, dört farklı sektörden birer adet hisse senedine ait gözlemlere yer verilmiştir.

### 2.1. LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı)

LSTM, 1997 yılında Hochreiter ve Schmidhuber tarafından geliştirilmiştir [11]. Geri yayılım algoritması gibi geleneksel sinir ağları eğitiminde karşılaşılan ve uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmeyi zorlaştıran, kaybolan gradyan sorununu çözmeyi amaçlayan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. LSTM, bu sorunu girdi kapısı, çıktı kapısı, unutmaya kapısı olmak üzere üç farklı kapı aracılığı ile çözer. Girdi kapısı yeni bilgilere ne kadar izin verileceğini ya da hücrede hangi verilerin depolanacağını, çıktı kapısı hücrede yapılacak güncellemelerin ya da hangi verilerin modelin çıktısında dahil edileceğini belirlemek için kullanılırken unutmaya kapısı ise hücrede hangi verilerin unutulacağını ya da atılacak verileri belirlemek için kullanılır.



Şekil 1. LSTM Mimarisi.

Şekil 1’de verilen LSTM mimarisinde,  $x_t$  bilgilerin girişini,  $\sigma$  sigmoid aktivasyonunu, denklem içeriğinde bulunan  $W$  parametre matrisi ve  $b$  ise vektörü temsil etmektedir. Şekil 1’de gösterilen LSTM yapısındaki kapıların ve katmanların denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir. Denklem (1)’de belirtildiği gibi, unutma kapısı, önceki gizli durum ve mevcut girdi kullanılarak hesaplanır. Girdi kapısı ise Denklem (2)’de açıklandığı üzere, yine önceki gizli durum ve mevcut girdiyi kullanarak hesaplanır. Denklem (3)’te açıklanan aday hücre durumu, önceki hücre durumu ve mevcut girdinin bir fonksiyonudur. Hafıza hücrelerinin güncellenmesi ise Denklem (4)’te gösterildiği gibi, önceki hücre durumu ile aday hücre durumunun birleşiminden oluşur. Çıkış kapısı, Denklem (5)’te açıklanan bir işlemle hesaplanır ve son olarak, gizli durum Denklem (6)’da belirtildiği gibi çıkış kapısı ve güncellenmiş hücre durumu kullanılarak hesaplanır. Bu denklemler, LSTM ağıının nasıl çalıştığını adım adım açıklayarak hücre durumu ve gizli durumun nasıl güncellendiğini gösterir.

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(WC \cdot [h_{t-1}, x_t] + bC) \quad (3)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (6)$$

Çalışmada LSTM ağı ile tahminleme gerçekleştirilmek amacıyla geliştirilen model üç katmana sahiptir ve her katmanda 100 nöron bulunmaktadır. Modelde, dropout oranı 0,2, loss fonksiyonu olarak MSE, optimizör olarak Adam, epoch sayısı 100 ve aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Dropout, overfitting’i önlemek için %20 olarak belirlenmiştir. MSE, regresyon hatalarını minimize etmek için seçilmiştir. Adam, hızlı ve doğru optimizasyon sağlar. ReLU ise pozitif girdilerde etkin çalışarak hesaplama verimliliği sunmaktadır. Modelin tahmin performansı hisse senedi kapanış fiyatları üzerinden değerlendirilmiştir. Modelin istatistiksel performans değerlendirmesi için iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemler; R-kare veya determinasyon katsayısı ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) olarak aşağıda denklemleriyle sıralanmıştır. Denklem (7)’de gösterildiği gibi, R-kare, gözlemlenen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi ölçen bir katsayıdır. Bu katsayı, modelin veri üzerindeki açıklayıcılığını gösterir ve modelin performansını değerlendirmek için kullanılır. R-kare değerinin 1’e yakın olması, modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu ifade etmektedir.

Denklem (8)’de verilen ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), modelin tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkı, yüzdelik hata cinsinden ölçer. MAPE değeri, tahmin edilen değerlerin ne kadar isabetli olduğunu yüzdelik olarak ifade eder. Düşük bir MAPE, modelin tahminlerinin doğru olduğunu gösterir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} * 100 \quad (8)$$

## 2.2. ARIMA (Oto regresif Entegre Hareketli Ortalama)

Oto regresif entegre hareketli ortalama (ARIMA), zaman serisi tahmininde kullanılan istatistiksel bir modeldir. Kısa vadeli tahmin yapmak için uygundur ve Box-Jenkins yöntemine dayanır [12]. Bu yöntem, zaman serisinin durağanlığını kontrol etmeyi, modelin AR (Oto regresif) ve MA (Hareketli Ortalama) bileşenlerini belirlemeyi ve modelin parametrelerini tahmin etmeyi içermektedir.

Durağanlık kavramı, zaman serisinin ortalama ve varyansının zamanla sabit kalması anlamına gelir. Durağan olmayan zaman serileri, tahmin yapmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle, ARIMA modeli uygulamadan önce zaman serisinin durağan hale getirilmesi gerekir. Durağanlığı kontrol etmek için otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) grafikleri kullanılır. AR bileşeni, geçmiş gözlemlerin, güncel gözlem üzerindeki etkisini modeller. MA bileşeni ise, geçmiş hata terimlerinin, güncel gözlem üzerindeki etkisini modeller.

Modelin bileşenleri:

p: AR bileşeninin derecesini göstermektedir. Bu bileşen, geçmiş p sayıda gözlemin, güncel gözlem üzerindeki etkisini belirlemektedir.

d: Zaman serisinin durağan hale getirilmesi gerektiğinden fark alma işleminin derecesini göstermektedir.

q: MA bileşeninin derecesini göstermektedir. Geçmiş hata terimlerinin, güncel gözlem üzerindeki etkisini belirlemektedir.

ARIMA modelinin genel gösterimi Denklem 9'daki gibidir:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (9)$$

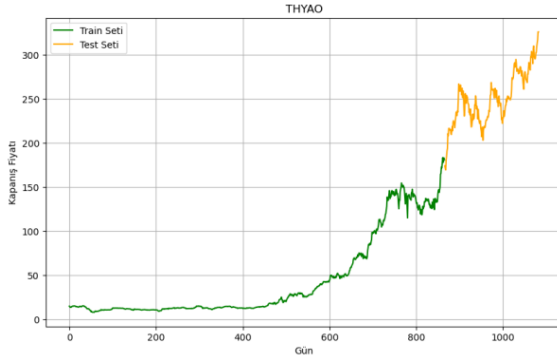
Burada,  $Z_t$ , zaman serisinin t. gözlemini,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ , AR parametrelerini,  $\varepsilon_t$ , hata terimini ve  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  ise MA parametrelerini ifade etmektedir.

## 3. Bulgular

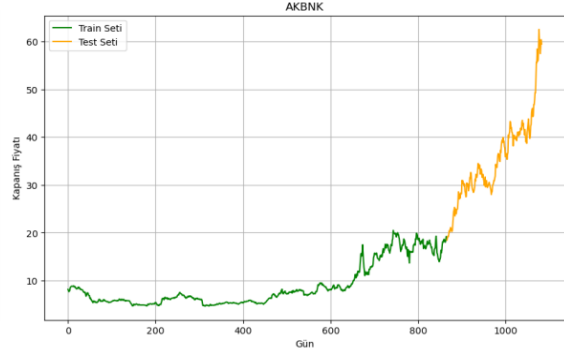
Çalışmada kullanılan LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek) ve ARIMA (Otokorelasyonlu Entegre Hareketli Ortalama) modellerinin sonuçlarına yer verilmiştir. Bu bölümde modellerin performanslarını değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla, belirli bir veri seti üzerinde yapılan analizler detaylandırılacaktır. Elde edilen sonuçlar, her iki modelin de tahmin yeteneklerini ve doğruluklarını ortaya koymakta olup, hangi modelin belirli senaryolarda daha etkili olduğunu göstermektedir. Aşağıda, LSTM ve ARIMA modellerinin sonuçlarına dair ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır.

### 3.1. LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı) Bulguları

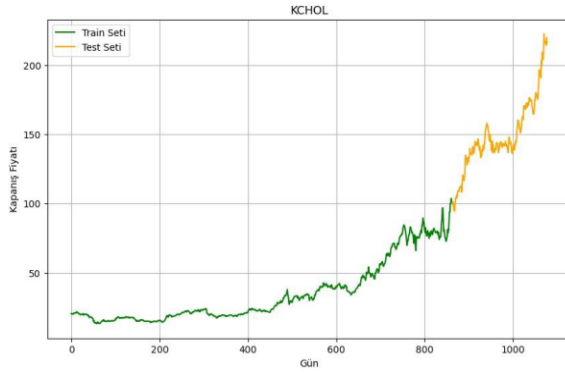
Bu bölümde, çalışmada kullanılan LSTM modelinin sonuçları ele alınmaktadır. Model, BİST30 endeksine dahil olan farklı sektörlerden seçilmiş dört şirketin hisseleri üzerinde test edilmiştir. Test edilen şirketler Türk Hava Yolları (THYAO), Akbank T.A.Ş. (AKBNK), Koç Holding A.Ş. (KCHOL) ve Kardemir Demir Çelik (KRDMD) olarak belirlenmiştir. Her hisse senedine ait veri setinin %80'i modelin eğitimi için ve %20'si test için ayrılmıştır. THYAO hisse senedinin eğitim ile test verilerinin grafiği Şekil 2'de, AKBNK hisse senedinin eğitim ile test verilerinin grafiği Şekil 3'te, KCHOL hisse senedinin eğitim ile test verilerinin grafiği Şekil 4'te, KRDMD hisse senedinin eğitim ile test verilerinin grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir.



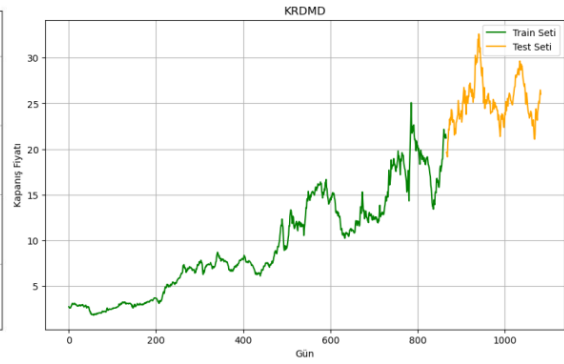
Şekil 2. THYAO Eğitim ve Test Verileri.



Şekil 3. AKBNK Eğitim ve Test Verileri.



Şekil 4. KCHOL Eğitim ve Test Verileri.



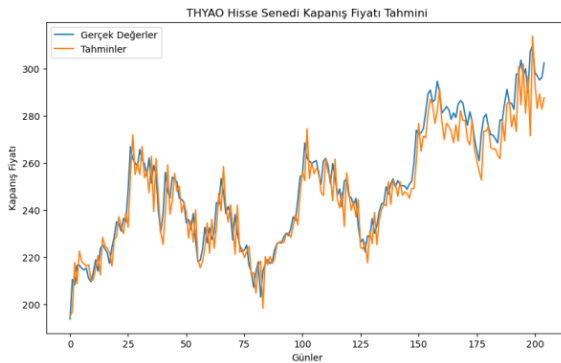
Şekil 5. KRDMMD Eğitim ve Test Verileri.

Oluşturulan LSTM modelinin eğitim ve test aşamasının sonucunda ortaya çıkan performans metrikleri MAPE,  $R^2$  Tablo 1'de gösterilmiştir. Elde edilen  $R^2$  değerlerinin 1'e oldukça yakın olması, MAPE değerlerinin ise 0'a yakın olması tahminin doğruluk oranının yüksek olduğunu fakat minimal sapmalar olabileceğini göstermektedir.

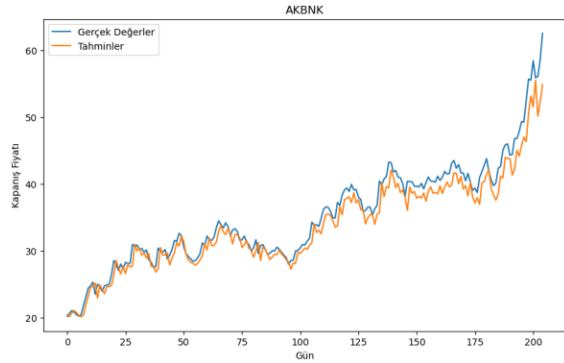
Tablo 1. Performans Metrikleri.

HİSSE SENEDİ	MAPE	$R^2$
THYAO	1,90	0,9040
AKBNK	1,32	0,9345
KCHOL	1,35	0,9263
KRDMMD	1,09	0,9422

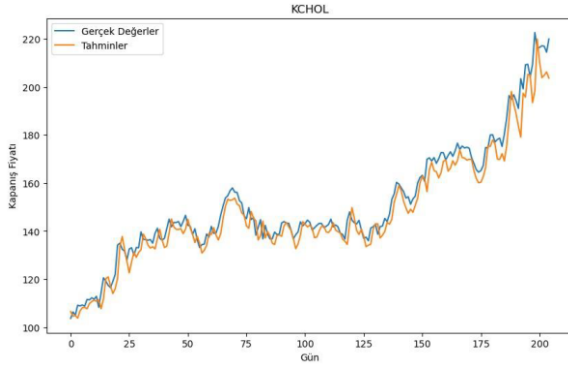
Çalışmada elde edilen, hisse senetlerine ait gerçek ve tahmini değerlerin grafiği Şekil 6-9'da gösterilmiştir. Ortaya çıkan tahmin verilerine ait grafikler, belirtildiği üzere gerçek verilere yakın tahminler üretildiğini göstermektedir.



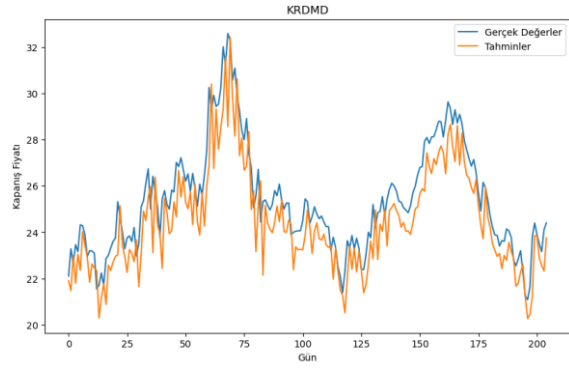
Şekil 6. THYAO Tahmin Verisi.



Şekil 7. AKBNK Tahmin Verisi.



Şekil 8. KCHOL Tahmin Verisi.



Şekil 9. KRDM D Tahmin Verisi.

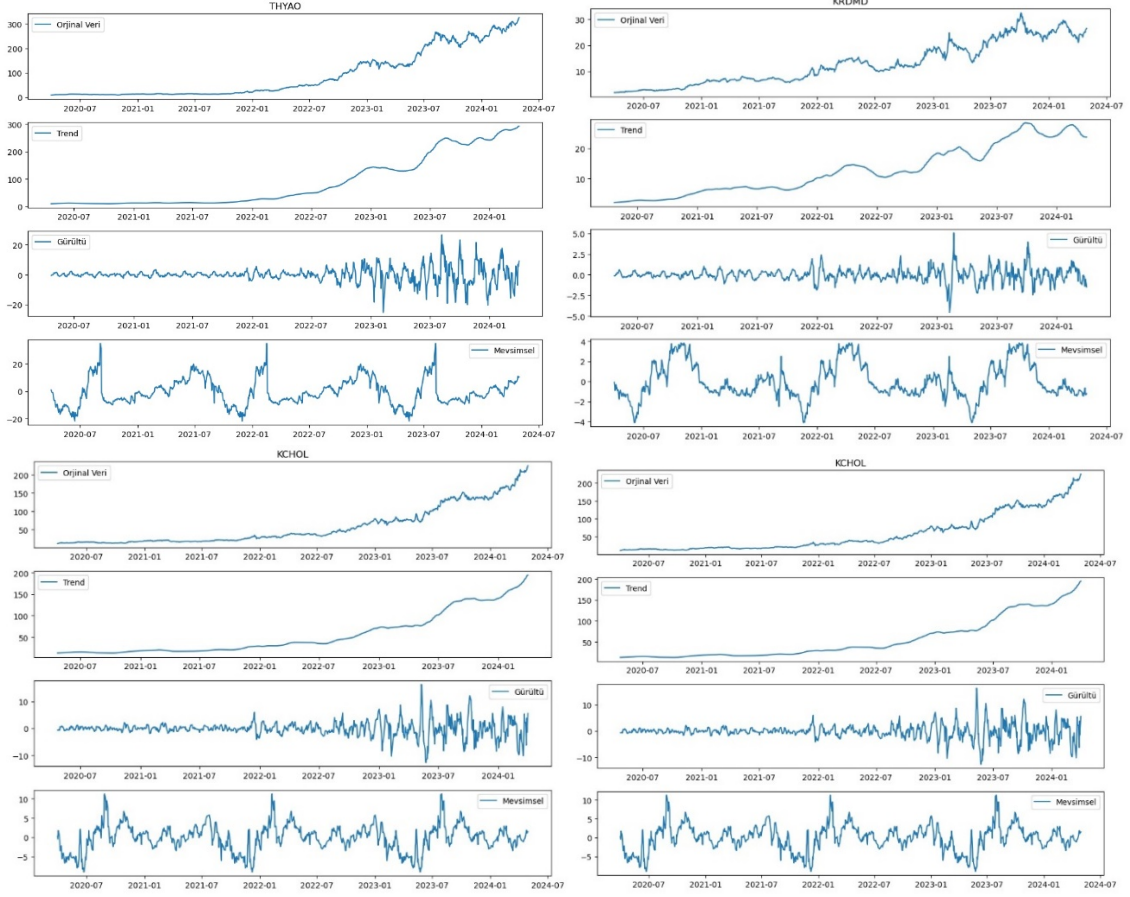
### 3.2. ARIMA (Oto regresif Entegre Hareketli Ortalama) Bulguları

Çalışmada kullanılan ARIMA modeline ait analizde, zaman serisi verilerinin mevsimsel trend, otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon özellikleri modelin yapı taşları olarak ele alınmıştır. Hisse senetlerine yönelik mevsimsel trend grafikleri Şekil 10'da yer almaktadır. Şekil 10, zaman serisinin orijinal durumu ve ilgili bileşenleri (trend, mevsimsel dalgalanmalar, gürültü) ile modelin analiz süreçlerine ışık tutmaktadır. Bu grafikler, zaman serisi verisinin bileşenlerinin ayrıştırılması yoluyla daha derinlemesine analiz edilmesini sağlamaktadır. THYAO grafiğinde, verinin zamanla nasıl arttığını ve özellikle 2022'nin sonlarından itibaren hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir. İkinci satır, zaman serisinin trend bileşenini göstermektedir. Trend, veri setinin genel eğilimini ifade etmektedir. Grafiğe göre verinin sürekli bir artış eğiliminde olduğu, genel olarak yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Üçüncü satır, mevsimsel bileşeni göstermektedir. Bu bileşen, veride belirli periyotlarla tekrar eden değişimleri ifade eder. Grafikte belirgin bir şekilde mevsimsel dalgalanmalar görülmektedir; belirli dönemlerde yüksek ve düşük noktalar arasında düzenli bir geçiş gözlemlenmektedir. Son satırda ise, verinin gürültü bileşeni yer almaktadır. Gürültü, verinin trend ve mevsimsel bileşenlerden arındırıldıktan sonra kalan rastgele dalgalanmaları temsil eder. Bu bileşen, verideki düzensiz ve öngörülemeyen değişiklikleri içerir. Görüldüğü üzere, gürültü bileşeni daha düzensiz ve ani değişiklikler göstermektedir. Bu grafikler, zaman serisi verisinin bileşenlerini ayrı ayrı analiz ederek daha iyi bir anlayış sağlamak için kullanılmaktadır. Orijinal veri ve trend bileşeni genel eğilimleri gösterirken, mevsimsel bileşen düzenli değişimleri, gürültü bileşeni ise öngörülemeyen değişiklikleri göstermektedir. Bu tür bir ayrıştırma, zaman serisi analizinde önemli bir adımdır ve genellikle tahmin modellerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

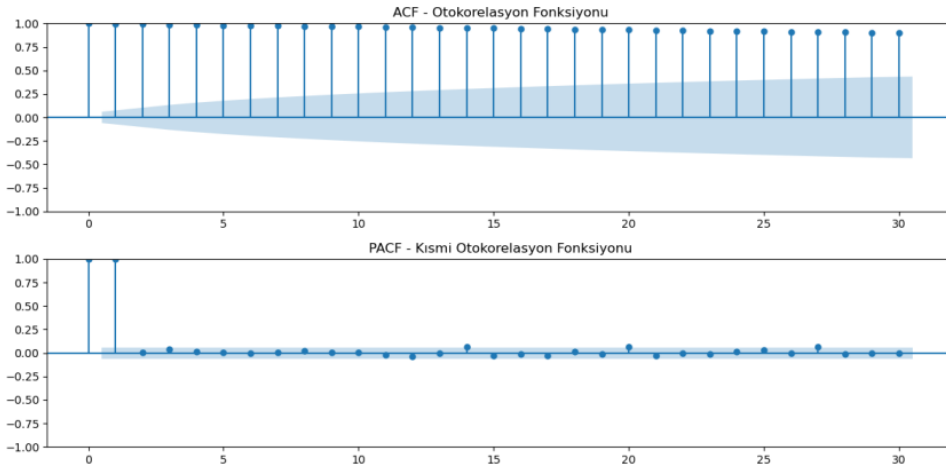
Şekil 11'de bir zaman serisi verisinin otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarını (ACF ve PACF) göstermektedir. Bu fonksiyonlar, zaman serisinin özelliklerini incelemek ve modelleme için uygun parametreleri belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Üstteki grafik, otokorelasyon fonksiyonunu (ACF) göstermektedir. ACF, zaman serisindeki her bir veri noktasının önceki veri noktalarıyla olan korelasyonunu ölçer. Burada, x eksenini gecikme sayısını (lag) ve y eksenini otokorelasyon katsayısını temsil eder. Grafikte mavi çubuklar otokorelasyon katsayılarını, mavi gölge alan ise güven aralığını göstermektedir. İlk gecikmeler için yüksek pozitif otokorelasyon değerleri görülmektedir, bu da zaman serisinde bir süreklilik olduğunu gösterir. Otokorelasyon katsayıları zamanla azalmaktadır, ancak sifıra yaklaşma eğilimi belirgin bir şekilde gözlenmemektedir. Bu, zaman serisinin durağan olmadığına ve trend içerebileceğine işaret eder. ACF, özellikle 0'dan saparak negatif değerler almaya başladığında, seri içindeki periyodik bileşenler veya dalgalanmalar hakkında bilgi verir. Altındaki grafik, kısmi otokorelasyon fonksiyonunu (PACF) göstermektedir. PACF, bir veri noktasının önceki noktalardan bağımsız olarak sadece bir önceki veri noktasıyla olan korelasyonunu ölçer. Yani, ara etkilerden arındırılmış korelasyon katsayılarını gösterir. İlk gecikmeler için yüksek pozitif kısmi otokorelasyon değerleri vardır. İlk gecikmeden sonra değerler hızla sifıra yaklaşmaktadır. Yalnızca ilk birkaç gecikme için anlamlı kısmi otokorelasyon değerleri gözlenmektedir; bu durum, AR (otomatik regresyon) modelinin düşük bir derece ile (muhtemelen AR(1) veya AR(2)) uygun olabileceğine işaret edebilir. Geri kalan gecikme değerleri için kısmi otokorelasyon sifıra oldukça yakındır, bu da önceki verilerin sonraki verilere olan etkisinin minimal olduğunu gösterir.

Veri setinin durağanlığı Dickey-Fuller [13] birim kök testleri ile analiz edilmiş, elde edilen ADF istatistiği ve p-değeri verilerin durağanlık göstermediğini ortaya koymuştur. Modelin p, d, q değerleri THYAO, AKBNK, KCHOL, KRDM D için sırasıyla (0,2,2), (2,1,2), (3,1,2), (2,1,2) değerlerini almıştır. Performans değerlendirmesi MAPE metriği ile yapılmış olup bahsi geçen bu metriğin çıktıları Tablo 2'de gösterilmiştir. Elde edilen tahmin

verileri Şekil 12-15'te gösterilmiştir. Tablo 2'de, elde edilen MAPE değerlerinin 0'dan oldukça uzakta olması göz ardı edilemeyecek sapmalar olduğunu ve gerçek değerlerden uzak tahminler ortaya çıktığını göstermiştir. Tahmin verilerine ait görseller de bu durumu kanıtlamaktadır.



Şekil 10. Hisselere Ait Mevsimsel Trend Grafikleri.

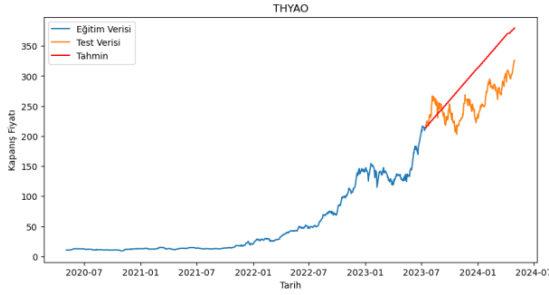
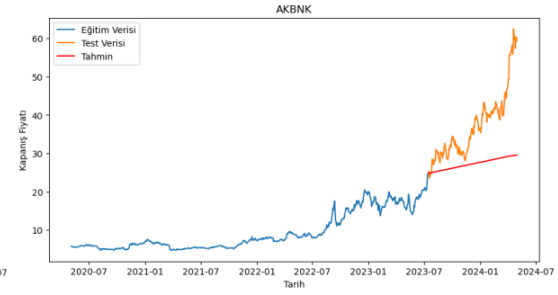
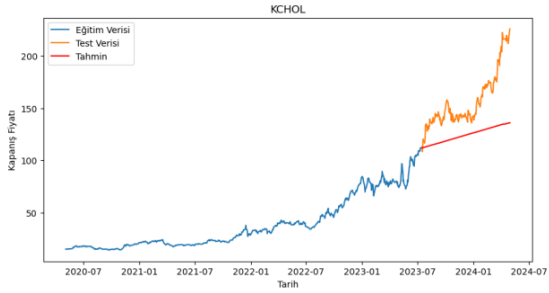
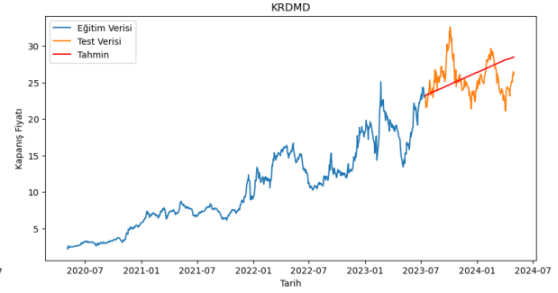


Şekil 11. THYAO ACF-PACF Grafiği.



**Tablo 2.** ARIMA Performans Göstergesi.

HİSSE SENEDİ	MAPE
THYAO	18,64
AKBNK	23,20
KCHOL	18,89
KRDMD	8,62

**Şekil 12.** THYAO ARIMA Tahmini.**Şekil 13.** AKBNK ARIMA Tahmini.**Şekil 14.** KCHOL ARIMA Tahmini.**Şekil 15.** KRDMMD ARIMA Tahmini.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Hisse senedi tahmininde bulunmak, ülkemizin sürekli değişen diplomatik, siyasi, ekonomik ve daha nice faktörlerinden dolayı oldukça zordur. Zira yalnızca teknik analiz tutarlı bir çıktı almak için yeterli olmadığı gibi yalnızca temel analiz de yeterli olmamaktadır. Bu çalışma, sürekli değişkenliğe sahip, tahmin edilmesi zor olan hisse senedi verilerinin analizinde kullanılan tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasını ve performansı daha yüksek olan yöntemi tespit etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada LSTM modeli, ARIMA modelinden daha yüksek performans göstermiştir. ARIMA kısa vadeli, günlük ve saatlik analizler için daha uygundur. Dolayısıyla pek çok dış faktöre bağlı olan ve günlük değişimleri sınırlı olan hisse senedi fiyatlarının tahmininde gösterdiği performansın düşük kaldığı, özellikle uzun vadeli tahminlerde kritik hatalar yaptığı gözlemlenmiştir. LSTM modelinin gerçeğe yakın değerler üretebilmesi ve yüksek performansı, doğru veriler ve parametre girdileri ile hisse senedi analizi için uygun olduğu, olumlu sonuçlar doğurabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlar, hisse senedi tahmininde kullanılacak modelin seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli kriterlerin altını çizmektedir. LSTM modelinin, zaman serilerinin karmaşık ve uzun vadeli bağımlılıklarını yakalama kapasitesi, onu özellikle belirsizliklerin ve ani değişimlerin sıkça görüldüğü finans piyasalarında tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir.

Öte yandan, ARIMA modelinin kısa vadeli tahminlerde hala geçerli ve faydalı bir araç olduğu unutulmamalıdır. ARIMA'nın sadeliği ve uygulanabilirliği, kısa vadeli fiyat hareketlerini anlamada ve hızlı tahminlerde bulunmada önemli avantajlar sunar. Ancak, uzun vadeli trendleri ve piyasa dalgalanmalarını

yakalamada sınırlı kalması, bu modelin karmaşık finansal tahminlerde tek başına yeterli olamayacağını göstermektedir.

LSTM modelinin üstün performansının altındaki nedenler arasında, modelin çok katmanlı yapısı ve geri yayılım algoritması sayesinde geçmiş verilerdeki desenleri ve eğilimleri daha etkili bir şekilde öğrenebilmesi bulunmaktadır. Bu nedenle, özellikle uzun vadeli yatırımlar ve stratejik kararlar için LSTM modeli daha sağlam ve güvenilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, BİST30 endeksindeki hisse senetlerinin fiyat tahmininde LSTM ve ARIMA modellerini karşılaştırmaktadır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma farklı sektörlerde ait hisse senetleri üzerinden model performanslarını incelemektedir. Ayrıca, 2020-2024 yılları arasındaki uzun dönem verileri kullanarak modellerin uzun vadeli tahmin performanslarını değerlendirmektedir. Çalışma verilerinin güncel olması çalışmanın literatüre güncel bir katkı sağlamasını ve mevcut piyasa koşullarına uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Çalışmada, ulaştırma, bankacılık, yatırım ve metaller-madencilik gibi farklı sektörlerde ait hisse senetleri analiz edilmiştir. Bu, modelin geliştirilebilirliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, literatürdeki birçok çalışma yalnızca bir modelin performansını incelerken, bu çalışmada hem ARIMA hem de LSTM modelleri aynı veri seti üzerinde karşılaştırılarak hangi modelin daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Bu, yatırımcıların hangi modeli tercih etmeleri gerektiği konusunda daha bilinçli kararlar vermelerine yardımcı olmaktadır. Model performansları, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve determinasyon katsayısı  $R^2$  gibi metriklerle kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu, modelin farklı performans kriterlerine göre incelenmesini sağlamaktadır.

Bir sonraki çalışmalarda hisse senedi tahmininde daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik elde etmek için hibrit modellerin geliştirilmesi ve kullanılması da değerlendirilebilir. Örneğin, kısa vadeli tahminler için ARIMA, uzun vadeli tahminler için ise LSTM modelinin kombinasyonu, daha kapsamlı ve dengeli bir analiz sağlayabilir. Bu yaklaşım, farklı modellerin güçlü yanlarını birleştirerek, hisse senedi tahminlerindeki belirsizlikleri ve hataları minimize edebilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmaların, piyasa koşullarının değişkenliğini ve çok boyutlu yapısını dikkate alarak, daha sofistike ve uyum sağlayabilen modeller üzerine odaklanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Sermaye Piyasası Kanunu. (2012, 30 Aralık). Resmî Gazete (Sayı: 28513). Erişim Adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/>
- [2] Albayrak E, Saran N. İstatistiksel ve derin öğrenme modellerini kullanarak hisse senedi fiyat tahmini. *Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi* 2023; 16(2): 161-169.
- [3] Hyndman RJ, Athanasopoulos G. *Forecasting: Principles and Practice*. Haziran 2018.
- [4] Gavcar E, Metin H. Hisse senedi değerlerinin makine öğrenimi (derin öğrenme) ile tahmini. *Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi* 2021; 10(2): 137-154.
- [5] Tanışman S, Karcioğlu AA, Uğur A, Bulut H. Bitcoin fiyatının LSTM ağı ve ARIMA zaman serisi modeli kullanarak tahmini ve karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; (32): 514-520.
- [6] Siami Namin S, Siami Namin A. *Forecasting economic and financial time series: ARIMA vs. LSTM*. Texas Tech University, 2018.
- [7] Tanışman S, Karcioğlu AA, Uğur A, Bulut H. Bitcoin fiyatının LSTM ağı ve ARIMA zaman serisi modeli kullanarak tahmini ve karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; (32): 514-520.
- [8] Albayrak E, Saran AN. Hisse senedi fiyat tahmini: İstatistiksel ve derin öğrenme modelleri kullanarak hisse senedi fiyat tahmini. *Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi* 2023; 16(2): 161-169.
- [9] Eylasov N, Çiçek M. Kripto para fiyatlarının tahmini: ARIMA-GARCH ve LSTM yöntemlerinin karşılaştırılması. *Finans Ekonomisi Ve Sosyal Araştırmalar Dergisi* 2024; 9(1): 48-62.
- [10] Yahoo Finance. (2024, Nisan 17). Erişim Adresi: <https://finance.yahoo.com/>
- [11] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation* 1997; 9(8): 1735-1780.
- [12] Box GE, Jenkins GM, Reinsel GC, Ljung GM. *Time series analysis: forecasting and control*. 5th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [13] Dickey DA, Fuller WA. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association* 1979; 74(366a): 427-431.



## Biosorption of Oxytetracycline with Waste Pine Tree Needles

Alper SOLMAZ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Protection and Control, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Iskenderun Technical University, Hatay, Türkiye  
\*<sup>1</sup> alper.solmaz@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 23/06/2024;

Kabul/Accepted: 30/08/2024)

**Abstract:** In this study, it was aimed to remove Oxytetracycline (Oxy), one of the pharmaceutical wastes, with the powder of pine tree (*Pinus nigra* Arn.) needle waste (*Pn-nw*). Experimental data obtained from batch adsorption studies carried out at pH  $5.0 \pm 0.5$  and temperature of  $23 \pm 2$  °C were tested with Pseudo first order, Pseudo second order and Intraparticle diffusion kinetic models and Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models and also error functions (Error Sum of Squares (SSE), Sum of Absolute Errors (SAE) and Average relative errors (ARE)). Furthermore, to support the adsorption of Oxy onto *Pn-nw*'s, the characterization of both raw and Oxy charged particles was done by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscope (SEM) analyses. The most appropriate kinetic model in the study was determined to be the Pseudo second order with an  $R^2$  value of 0.999 and the Freundlich isotherm model with an  $R^2$  value of 0.991. Additionally, the amount of Oxy removed per unit *Pn-nw* ( $q_{max}$ ) was calculated as 30.35 mgOxy/g*Pn-nw*. The results show that *Pn-nw* is a very promising and environmentally friendly adsorbent for Oxy removal.

**Key words:** Oxytetracycline, *Pinus nigra* Arn., needle wastes, adsorption, kinetics, isotherm.

## Atık Çam Ağacı İğneleri ile Oksitetrasiklin'in Biyosorpsiyonu

**Öz:** Bu çalışmada, farmasötik atıklardan biri olan Oksitetrasiklin'in (Oks), çam ağacı (*Pinus nigra* Arn.) iğne atığı (*Pn-ia*) tozları ile giderimi amaçlanmıştır. pH  $5,0 \pm 0,5$  ve  $23 \pm 2$  °C sıcaklıkta gerçekleştirilen kesikli adsorpsiyon çalışmalarından elde edilen deneysel veriler, Pseudo first order, Pseudo second order ve Intra-particle diffusion kinetik modelleri ve Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modelleri ile test edilmiş ve sonuçlar hata fonksiyonları (Hata Kareler Toplamı (HKT), Mutlak Hatalar Toplamı (MHT) ve Ortalama Bağlı Hatalar (OBH)) ile incelenmiştir. Ayrıca, *Pn-ia*'lar üzerine Oks'nin adsorpsiyonunu desteklemek amacıyla hem ham hem de Oks yüklü parçacıkların karakterizasyonu Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ve scanning electron microscope (SEM) analizleri ile yapılmıştır. Çalışmada en uygun kinetik modelin 0,999  $R^2$  değeri ile Pseudo second order ve 0,991  $R^2$  değeri ile Freundlich izoterm modeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca birim *Pn-ia* başına giderilen Oks miktarı ( $q_{max}$ ) 30,35 mgOks/g*Pn-ia* olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar *Pn-ia*'ların Oks gideriminde oldukça umut verici ve çevre dostu bir adsorban olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Oksitetrasiklin, *Pinus nigra* Arn., iğne atıkları, adsorpsiyon, kinetik, izoterm.

### 1. Introduction

Various types and quantities of wastewater are formed as a result of human consumption water and industrial processes. Rapid population growth, industrialization and changing living conditions cause the production and consumption of new products in many sectors. In this context, the composition of the wastewater formed is also changing. While in the past, the focus was on the removal of basic pollutants in wastewater, today there are many pollutants called emerging contaminants that have many toxic effects on the receiving environment [1]. These can be listed as pharmaceuticals, pesticides and personal care products formed as a result of human and animal consumption. Among these, antibiotics from pharmaceutical waste are frequently consumed by both humans and animals [1,2].

Antibiotics are needed to continue vital activity in our country and around the world. It is known that antibiotics, discovered in 1910 and used since then, extend the lifespan of living things. With the discovery of penicillin, its use gained momentum and is widely used today [3]. It is estimated that approximately 100 thousand to 200 thousand tons of antibiotics are used in the world. Tetracyclines were discovered in 1948 and Oxy has an important place in this group. Oxy is a highly preferred antibiotic in both land farming and aquaculture [4]. After these antibiotics enter the body, 5-90% of them are excreted directly from the body with feces or urine without being used, and reach the receiving environment through various means [5,6].

\* Sorumlu yazar: [alper.solmaz@iste.edu.tr](mailto:alper.solmaz@iste.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-6928-3289

Antibiotics entering the aquatic environment can be degraded by various mechanisms. They are first broken down into macromolecules and then into small molecules. Antibiotics in this state create pollutant potential in the aquatic ecosystem and cause toxic effects on living creatures in the environment. There are various methods for the treatment of pharmaceutical wastes in the aquatic environment. These are biological, electrochemical oxidation, photocatalysis, UV degradation and adsorption processes that remove organic and inorganic contaminants [7–10]. Although each of the listed treatment technologies has advantages and disadvantages over each other, the most important thing is that there is a tendency towards technologies that are cheap, fast and have high removal efficiency [1]. One of the most frequently used treatment methods in this context is adsorption. Although there are various studies with on activated carbon [11,12], or nanoparticles [13,14] produced using various methods, there are also studies on the removal of agricultural or some industrial wastes with cheap and easily available biosorbents [15–18].

In this study, *Pn-nw*, which is frequently found in the natural environment and does not have any economic value and is evaluated as waste, was tried to be evaluated as a biosorbent. The adsorption of Oxy, one of the pharmaceutical wastes that has a toxic effect in the aquatic environment, was carried out with the obtained biosorbent. Three different kinetic and isotherm models were tried and various error functions were used to find the most suitable one. Additionally, FTIR and SEM images of raw and Oxy-loaded *Pn-nw* charged particles were examined.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Chemicals

Pan Trivalent injection solution (containing 30 mg Oxytetracycline hydrochloride in 1 mL volume, Zoetis, Turkey) was used as the oxytetracycline source. For pH adjustment, 0.1 M sodium hydroxide (NaOH, 40.00 g/mol,  $\geq 99.0\%$ , Sigma-Aldrich) in pellet form and 0.1 M sulfuric acid ( $\text{H}_2(\text{SO}_4)_3$ , 1.81 g/cm<sup>3</sup>,  $\geq 90-91\%$ , Merck) in liquid form were used. Distilled water was used in dilution processes.

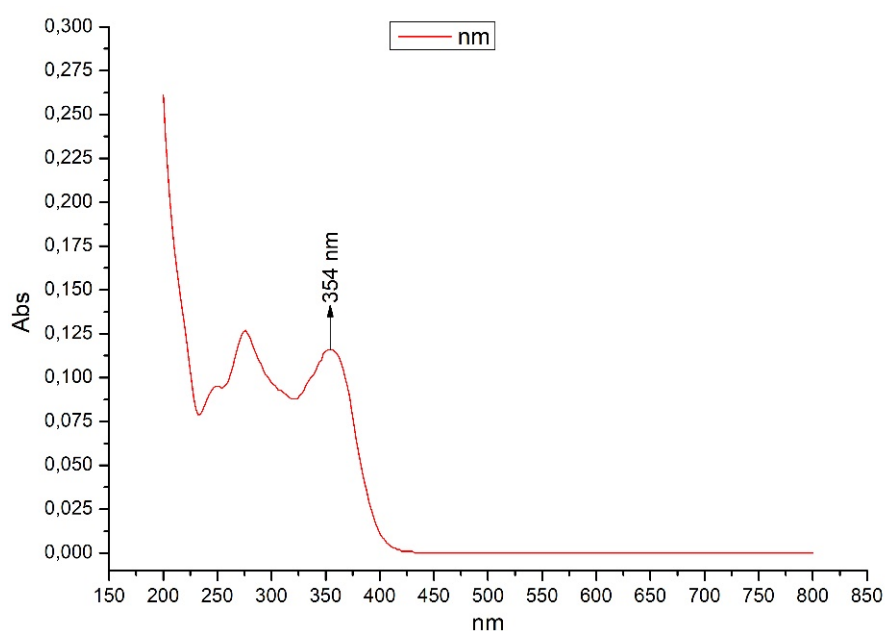
### 2.2. Preparation and characterization of *Pn-nw*

*Pn-nw* used in the study was obtained from Diyarbakır region (Türkiye). Pine needles collected as litter from under the tree were first washed with tap water, then passed through pure water and dried in sunlight. After the dry wastes were ground in the laboratory mill, they were passed through 75-micron sieves and made ready for use in experiments.

SEM images (Gemini 500, Zeiss) were taken to see the changes before and after the adsorption of Oxy molecules onto the surface of *Pn-nw*. In addition, FTIR (Spotlight 400, Perkin Elmer) analysis was performed to determine the surface functional groups before and after the reaction.

### 2.3. Adsorption studies

Batch adsorption experiments were carried out at room temperature ( $23 \pm 2$  °C). On the other hand, the highest water solubility of Oxy was found in the pH range of 4-7, especially pH  $5.0 \pm 0.5$  [19]. On the other hand, Oxy stock solution with a concentration of 500 mg/L was prepared. Certain dilutions were made from this stock solution and a calibration curve was produced on a UV-Vis spectrophotometer (DR6000, Hach) at a wavelength of 354 nm [15,20,21]. Also, wavelength scanning was performed on the UV-Vis spectrophotometer (DR6000, Hach) to see the peak of the Oxy solution at the maximum point (Figure 1). In addition, a polystyrene spectrophotometer cuvette with dimensions of 12.5x12.5x45 mm was used. The equation  $y = 0.0279x + 0.0243$  ( $R^2 = 0.9987$ ) was obtained. In experimental studies, the concentration calculation was calculated with the help of this equation.



**Figure 1.** Wavelength scanning of Oxy solution in UV-VIS Spectrophotometer ( $C$ : 3.28 mg/L,  $T$ :  $23 \pm 2$  °C).

Batch adsorption tests were performed in an orbital mixer (Heidolph, Unimax1010, Germany) at 200 rpm. As a result of the experiments, equations 1 and 2 were used to calculate the removal efficiency ( $R$ ) as a percentage and the amount of pollutant removed per unit adsorbent ( $q_e$ ).

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

The terms  $C_0$  and  $C_e$  used in both equations express the Oxy concentration (mg/L) at the beginning and end of the experiment. The term  $q_e$  expresses the amount of Oxy removed per unit  $Pn$ -nw at equilibrium (mg/g). In addition, the term  $V$  represents the solution volume (L) and the term  $m$  represents the amount of  $Pn$ -nw (g).

#### 2.4. Kinetic and isotherm models and error functions

In order to make a kinetic evaluation as a result of adsorption experiments, adsorbent was added to a 50 mL volume solution with 50 mg/L Oxy concentration, with a concentration of 1 g/L, and samples were taken at certain time intervals and the Oxy concentration was read on the spectrophotometer in the upper phase water. On the other hand, in order to evaluate isotherm models,  $Pn$ -nw was added to 7 different samples with initial Oxy concentration ranging from 17.24 to 128.40 mg/L and each with a volume of 10 mL, with an initial adsorbent amount of 1.5 g/L. At the end of the study, Oxy concentration was determined in the upper phase water. The equations of the kinetic and isotherm models used are presented in Table 1.

The terms  $C_0$  and  $C_e$  specified in the table indicate the Oxy concentrations (mg/L) in the solution at the beginning and end of the experiment, respectively, and  $q_t$  and  $q_e$  indicate the amount of Oxy removed per unit  $Pn$ -nw (mg/g) at a time  $t$  and in equilibrium, respectively. On the other hand,  $k_1$  term is Pseudo-first-order,  $k_2$  term is Pseudo-second-order and  $K_{id}$  is Intra-particle diffusion model constant. In addition, the terms  $K_f$  and  $n$  represent the constant in the Freundlich model, and the terms  $K_L$  and  $a_L$  represent the constant in the Langmuir model, while  $R_L$  represents the dispersion constant. In addition, while  $B$  in the Temkin model represents the model constant, the term  $b_T$  represents the isotherm constant based on heat (kJ/mol), the term  $R$  represents the universal gas constant (8.314 J/mol.K) and  $T$  represents the temperature (K).

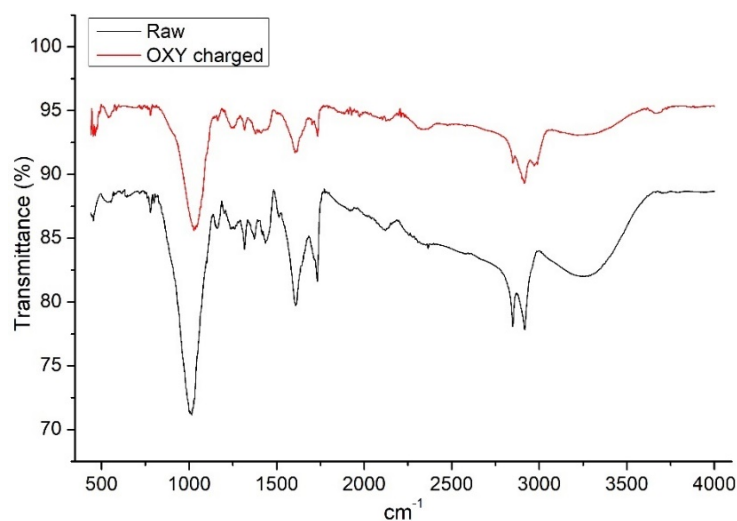
**Table 1.** Kinetic and isotherm models and error functions used in the study.

	Model	Equation	References
Kinetic models	Pseudo-first-order	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	[22]
	Pseudo-second-order	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	[23]
	Intra-particle diffusion	$q_t = K_{id} t^{1/2} + C$	[24]
Isotherm models	Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	[25,26]
	Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} R_L = \frac{1}{1 + a_L C_e}$	[27,28]
	Temkin	$q_e = B \ln(A_T C_e) B = \frac{RT}{b_T}$	[28,29]
Error functions	Error Sum of Squares (SSE)	$SSE = \sum (q_{e,cal} - q_{e,exp})^2$	
	Sum of Absolute Errors (SAE)	$SAE = \sum_{i=1}^n  q_{e,exp} - q_{e,cal} $	[30]
	Average relative errors (ARE)	$RAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{q_{e,cal} - q_{e,exp}}{q_{e,exp}} \right $	

### 3. Results and Discussion

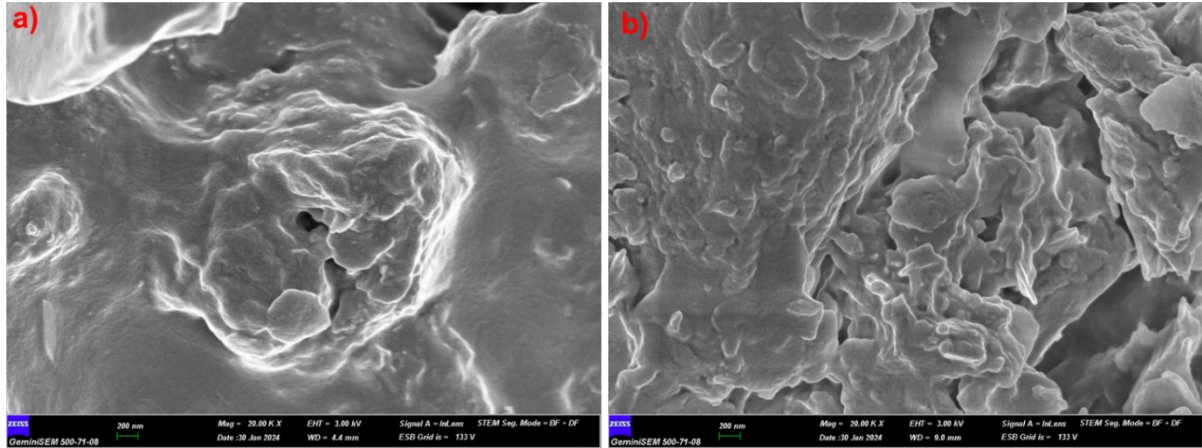
#### 3.1. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

In order to determine the surface characteristics in the adsorption of Oxy onto *Pn*-nw, FTIR spectroscopic analysis of both raw and Oxy-charged particles was performed. In this way, information about the functional groups and chemical composition of the material was provided. The obtained results are presented in Figure 2. Accordingly, functional groups are observed on both raw and Oxy charged particles. The strong peaks seen in the 1000 bands in the figure are considered to be -C-C- and -C-N- bonds [31]. Again, the peaks in the range of 1500-1600 represent the carbonyl group and NH group [32]. The peaks around 1750  $\text{cm}^{-1}$  can be identified as the vibration of C=O and C=C [33]. The peak in the 2900 bands represents the -CH<sub>2</sub> group [34].


**Figure 2.** FTIR diagram of *Pn*-nw before and after the reaction.

### 3.2. Scanning electron microscopy (SEM)

The morphological structure of *Pn*-nw before and after adsorption was visualized and presented in Figure 3. When looking at the raw image of *Pn*-nw in Figure 3 (a), irregularity is seen, but there are some indentations/protrusions. It can be said that after adsorption, the indentation/protrusion on the surface increases and blurriness occurs in the image.



**Figure 3.** SEM images of *Pn*-nw before (a) and after (b) reaction.

### 3.3 Adsorption kinetics

The numerical values obtained in the laboratory for the adsorption of Oxy molecules by *Pn*-nw particles were tested in Pseudo first order, Pseudo second order and Intra-particle diffusion models, and a summary of the results is presented in Table 2. On the other hand, the regression curves obtained from the linear forms of the models are shown in Figure 4 (a), (b) and (c), and the comparison of the results obtained in experimental studies with each model is shown in Figure 4 (d).

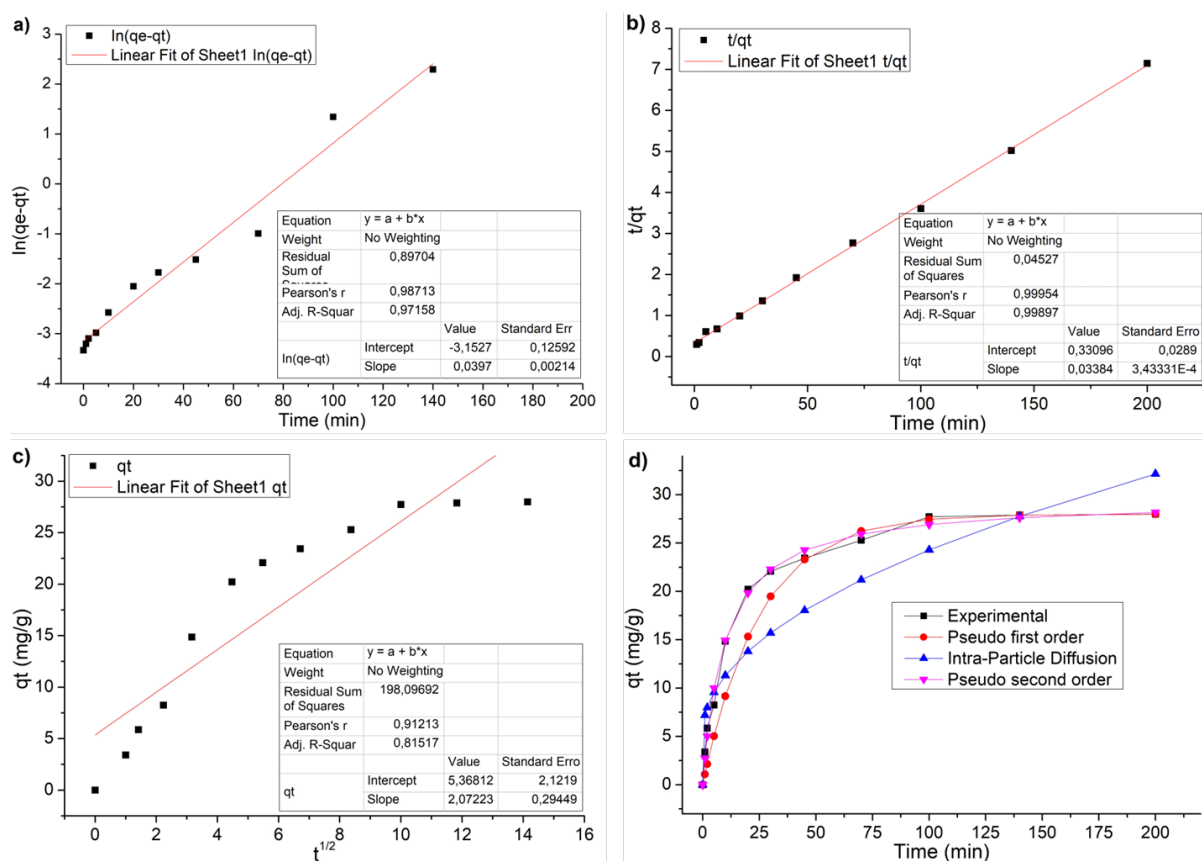
When Table 2 is examined, the  $R^2$  values of the Intra-particle diffusion and Pseudo first order models are calculated as 0.815 and 0.972, respectively, while the  $R^2$  value of the Pseudo second order model is calculated as 0.999. In choosing the most appropriate model, evaluation of error functions is very important for the accuracy of the result. In this context, when we look at the SSE value, which is the sum of the squares of the difference between the amount of pollutants removed per unit adsorbent ( $q_{e,cal}$ ) obtained from each model and the results obtained from experimental studies ( $q_{e,exp}$ ), it is seen that the lowest value is 6.24 in the Pseudo second order kinetic model.

**Table 2.** Summary of kinetic models calculated for the adsorption of Oxy molecules onto *Pn*-nw.

Kinetic models	Parameters	$R^2$	SSE	SAE	ARE
Pseudo first order	$k_1 = 0.052$	0.972	93.53	23.81	35.73
Pseudo second order	$k_2 = 0.003$ $q_e = 29.55$	0.999	6.24	6.646	9.85
Intra-particle diffusion	$k_i = 1.898$ $a = 5.312$	0.815	190.22	40.79	45.06

In addition, the Pseudo second order kinetic model has the lowest SAE value, which is the sum of the absolute value of the difference between the experimental results and the model results, with a value of 6.65. Finally, when we look at the ARE, which is obtained from the absolute value of dividing the difference between the model and the experimental results by the experimental results, it is seen that the Pseudo second order kinetic model is the lowest.





**Figure 4.** Regression curves of kinetic models a) Pseudo first order, b) Pseudo second order, c) Intra-particle diffusion, d) Comparison graph of  $q_t$  values against time.

On the other hand, the standard deviations between the points obtained in each model and the linear fit line were examined and presented in the tables in Figure 4 a, b and c. When the standard errors in terms of intercept are examined, it is seen that the standard deviations of the Pseudo first order and Intra-particle diffusion models are 0.126 and 2.122. However, it is seen that this value is 0.0289 in the Pseudo second order. Again, when the standard deviation of the slope value is examined, it is seen as 0.002, 0.295 and 0.0003 in the Pseudo first order, Intra-particle Pseudo second order models, respectively. As can be seen from the  $R^2$  and error functions, the adsorption of Oxy molecules onto *Pn-nw* fits the Pseudo second order kinetic model. The findings were compared with the literature and presented in Table 3. Willow waste was used as a biosorbent and in a study where Oxy removal was performed, it was reported that the removal mechanism was Pseudo first order with an  $R^2$  value of 0.956 at the end of the 90-minute reaction [35].

Also, it was reported that in a study in which spiky green horse chestnut bark was used as a biosorbent and acetaminophen removal was carried out, the removal mechanism complied with the Pseudo second order kinetic model with an  $R^2$ :0.999 value [36]. On the other hand, in a study where *Posidonia oceanica* was used as a biosorbent and oxy removal was carried out, it was reported that the most suitable model was Pseudo second order [15]. In a different study where eggshells were used as biosorbents and various pharmaceuticals were removed, it was reported that the removal mechanism was applied to the Pseudo second order model [37]. In another study, in which 5 different pharmaceutical wastes were eliminated with tomato wastes, it was reported that the  $R^2$  value was  $>0.995$ , again complying with the Pseudo second order model [38]. When we look at the mechanism in the pseudo second order kinetic model, it can be said that the removal occurs in 4 steps. The first of these is the mass transfer of the pollutant to the boundary film on the adsorbent, the second step is diffusion through the film surrounding the surface of the adsorbent, and the third step is diffusion in the pores of the adsorbent (here ions are both absorbed into the active sites and ion exchange occurs). The last one can be expressed as adsorption occurring in free regions on the adsorbent [39].

**Table 3.** Comparison of results with literature.

Parameters	This study	[35]	[16]	[40]	[15]
Origin of biosorbent	<i>Pn-nw</i>	Willow	Rice husk ash	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	<i>Posidonia oceanica</i>
Pollutant type	Oxy	Oxy	Oxy	Oxy	Oxy
$q_{\max}$ (mg/g)	30.35	5.94-21.93	>3.34	29.18	11.8
Optimum pH	5.0	7.0	4-6	8.2	6.0
Working time (min)	200	90	540	11 h	60
Initial pollutant conc. (mg/L)	17.24-128.40	5-30	50-200	2.5-15	20-175 $\mu\text{mol/L}$
Best fit kinetic model	Pseudo second order	Pseudo first order	Bangham	Pseudo first order	Pseudo second order
Kinetic model $R^2$	0.999	>0.956	>0.957	>0.971	-
Best fit isotherm model	Freundlich	Langmuir	Sips	Langmuir	Langmuir
Isotherm model $R^2$	0.991	>0.962	>0.981	0.998	-

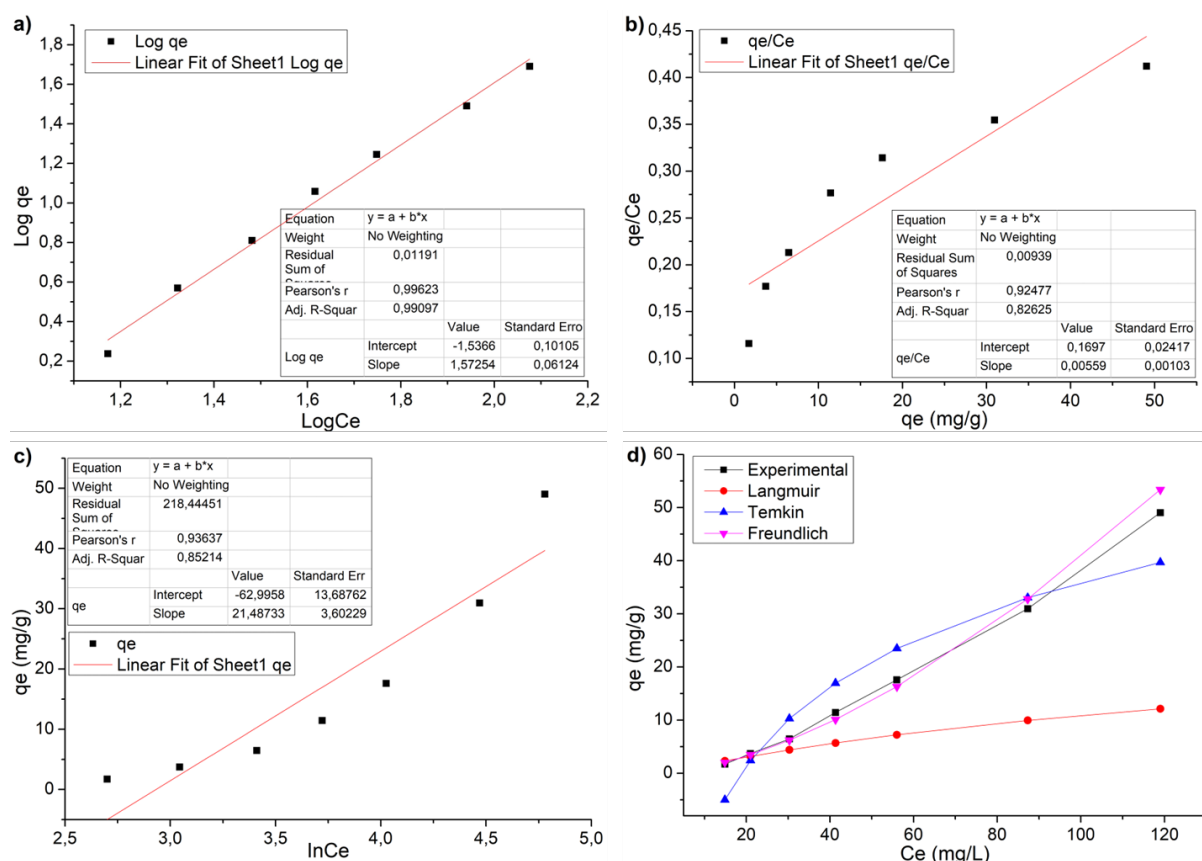
### 3.4. Adsorption isotherms

Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models were used to interpret the numerical expressions obtained from the experiments carried out on the adsorption of Oxy molecules on *Pn-nw* particles. The results obtained from the models are presented in Table 3. In addition, the graphics obtained from the linear forms of each model are presented in Figure 5 (a), (b) and (c). In addition, the amount of Oxy removed per unit adsorbent obtained from each model, compared to the Oxy concentrations remaining in solution in the experimental unit, is displayed in Figure 5 (d).

**Table 3.** Summary of isotherm models calculated for the adsorption of Oxy molecules onto *Pn-nw*.

	Parameters	$R^2$	SSE	SAE	ARE
Freundlich	$k_F = 0.029$ $1/n = 1.573$	0.991	25.64	9.55	12.3
Langmuir	$k_L = 0.006$ $R_L = 0.855$ $q_{\max} = 30.35$	0.826	1949.2	77.22	66.7
Temkin	$B_T = 0.113$ $k_T = 0.053$	0.852	218.45	34.70	118.1

When Table 3 is examined, the  $R^2$  values of the Langmuir and Temkin models were calculated as 0.826 and 0.852, respectively, while the  $R^2$  value of the Freundlich model was found to be 0.991. Considering the SSE, SAE and ARE values, they are calculated as 25.64, 9.55 and 12.3, respectively. Again, as in the kinetic model, the standard deviations between the points obtained in each model and the linear fit line are examined and presented in the tables in Figure 4 a, b and c. When the standard errors in terms of intercept are examined, it is seen that the standard deviations of the Langmuir and Temkin models are 0.024 and 13.688. However, it is seen that this value is 0.101 in the Freundlich model. Again, when the standard deviation of the slope value is examined, it is seen that it is 0.001, 3.602 and 0.061 in the Langmuir, Temkin and Freundlich models, respectively.



**Figure 5.** Regression curves of isotherm models (a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin, d) Comparison plot of  $q_t$  values against  $C_e$  values.

As can be seen from the table, it is seen that the adsorption of Oxy molecules on *Pn-nw* particles complies with the Freundlich isotherm model. When the literature was examined, in a different study where *Phaeodactylum tricorutum* culture was used as a biosorbent, a study was conducted at Oxy concentrations in the range of 2.5-15 mg/L and the most suitable model was reported to be Langmuir with an  $R^2$  value of 0.998. It was also reported that the  $q_{max}$  value was determined as 29.18 mg/g [40]. Also, it was reported that *Prunus domestica* L. biomass was modified and used as a biosorbent and 6 different pharmaceutical wastes were eliminated, and that it complied with the Freundlich isotherm model with an  $R^2 > 0.942$  value. Additionally, the maximum pollutant removed per unit adsorbent was calculated as 17.503-22.104 mg/g [41]. In another study, Oxy removal was done with willow waste and the most suitable isotherm model was reported to be Langmuir and the  $q_{max}$  value was 21.93 [35]. In a different study, the removal of 5 different drugs was achieved with the biosorbent obtained by modification of the green alga *Scenedesmus obliquus* and it was reported that the most suitable model was Freundlich. In addition, the maximum removal capacity of the adsorbent was reported to be 39-68 mg/g in the study [42].

#### 4. Results

In this study, Oxy, one of the pharmaceutical wastes frequently used in veterinary services, was attempted to be removed by *Pn-nw*, a waste product. Pseudo-first-order, Pseudo-second-order and Intra-particle diffusion kinetic models and Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models were tried and also error functions (SSE, SAE and ARE) were used for comparison of results. Additionally, FTIR and SEM images of raw and loaded *Pn-nw* were examined to support the adsorption mechanism. According to the results obtained, the most suitable kinetic and isotherm models were found to be Pseudo second order ( $R^2$ : 0.999) and Freundlich ( $R^2$ : 0.991), respectively. On the other hand,  $q_{max}$  was calculated as 30.35 mgOxy/g*Pn-nw*. This study determined that it is possible to use *Pn-nw* in the removal of Oxy, one of the emerging contaminants.

## References

- [1] Cüce H, Cagcag Yolcu O, Aydın Temel F. Combination of ANNs and heuristic algorithms in modelling and optimizing of Fenton processes for industrial wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2023; 20:6065-78.
- [2] Taheran M, Naghdi M, Brar SK, Verma M, Surampalli RY. Emerging contaminants: Here today, there tomorrow! *Environ Nanotechnol Monit Manag* 2018; 10: 122-6.
- [3] Hutchings MI, Truman AW, Wilkinson B. Antibiotics: past, present and future. *Curr Opin Microbiol* 2019; 51: 72-80.
- [4] LI Z jun, QI W ning, FENG Y, LIU Y wang, Ebrahim S, LONG J. Degradation mechanisms of oxytetracycline in the environment. *J Integr Agric* 2019; 18: 1953-60.
- [5] Pelosato R, Bolognino I, Fontana F, Sora IN. Applications of Heterogeneous Photocatalysis to the Degradation of Oxytetracycline in Water: A Review. *Molecules* 2022; 27: 2743.
- [6] Li D, Shao H, Huo Z, Xie N, Gu J, Xu G. Typical antibiotics in the receiving rivers of direct-discharge sources of sewage across Shanghai: occurrence and source analysis. *RSC Adv* 2021; 11: 21579-87.
- [7] Rivera-Utrilla J, Ocampo-Perez R, Sanchez-Polo M, Lopez-Penalver JJ, Gomez-Pacheco CV. Removal of Tetracyclines from Water by Adsorption/Bioadsorption and Advanced Oxidation Processes. A Short Review. *Curr Org Chem* 2018; 22: 1005-21.
- [8] Huang A, Yan M, Lin J, Xu L, Gong H, Gong H. A Review of Processes for Removing Antibiotics from Breeding Wastewater. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18: 4909.
- [9] Li D, Yang M, Hu J, Ren L, Zhang Y, Li K. Determination and fate of oxytetracycline and related compounds in oxytetracycline production wastewater and the receiving river. *Environ Toxicol Chem* 2008; 27: 80-6.
- [10] Cüce H, Aydın Temel F. Efficient Removal Performance of COD in Real Laundry Wastewater via Conventional and Photo-Fenton Degradation Systems: A Comparative Study on Oxidants and Operating Time by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>. *Arab J Sci Eng* 2023; 48: 15823-35.
- [11] Solmaz A, Karta M, Depci T, Turna T, Sari ZA. Preparation and characterization of activated carbons from Lemon Pulp for oxytetracycline removal. *Environ Monit Assess* 2023; 195: 797.
- [12] Kazak Ö. Single-step pyrolysis for producing activated carbon from sucrose and its properties for methylene blue removal in aqueous solution. *Environmental Research and Technology* 2021; 4: 165-75.
- [13] Fan Y, Su J, Xu L, Liu S, Hou C, Liu Y, vd. Removal of oxytetracycline from wastewater by biochar modified with biosynthesized iron oxide nanoparticles and carbon nanotubes: Modification performance and adsorption mechanism. *Environ Res* 2023; 231: 116307.
- [14] Lin X, Xu Q, Gan L, Owens G, Chen Z. Cyclodextrin modified green synthesized graphene oxide@iron nanoparticle composites for enhanced removal of oxytetracycline. *J Colloid Interface Sci* 2022; 608: 3159-67.
- [15] Ferchichi K, Amdouni N, Chevalier Y, Hbaieb S. Low-cost *Posidonia oceanica* bio-adsorbent for efficient removal of antibiotic oxytetracycline from water. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29: 83112-25.
- [16] Andrade CA, Zambrano-Intriago LA, Oliveira NS, Vieira JS, Quiroz-Fernández LS, Rodríguez-Díaz JM. Adsorption Behavior and Mechanism of Oxytetracycline on Rice Husk Ash: Kinetics, Equilibrium, and Thermodynamics of the Process. *Water Air Soil Pollut* 2020; 231: 103.
- [17] Şentürk İ, Alzein M. Adsorption of Acid Violet 17 onto Acid-Activated Pistachio Shell: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Acta Chim Slov* 2020; 67: 55-69.
- [18] Cüce H, Temel FA. Reuse of agro-wastes to treat wastewater containing dyestuff: sorption process with potato and pumpkin seed wastes. *International Journal of Global Warming* 2021; 24: 14.
- [19] Sun Y, Yue Q, Gao B, Li Q, Huang L, Yao F, vd. Preparation of activated carbon derived from cotton linter fibers by fused NaOH activation and its application for oxytetracycline (OTC) adsorption. *J Colloid Interface Sci* 2012; 368: 521-7.
- [20] Yildiz S, Canbaz GT, Mihçioğur H. Photocatalytic degradation of oxytetracycline using  $ZnO$  catalyst. *Environ Prog Sustain Energy* 2024; 43.
- [21] Berger M, Ford J, Goldfarb JL. Modeling aqueous contaminant removal due to combined hydrolysis and adsorption: oxytetracycline in the presence of biomass-based activated carbons. *Sep Sci Technol* 2019; 54: 705-21.
- [22] Lagergren SK. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Sven. Vetenskapskad. Handlingar* 1898; 24: 1-39.
- [23] Ho YS, Wase D, Forster CF. Removal of lead ions from aqueous solution using sphagnum moss peat as adsorbent. *Water SA* 1996; 22: 214-9.
- [24] Boyd GE, Adamson AW, Myers LS. The Exchange Adsorption of Ions from Aqueous Solutions by Organic Zeolites. II. Kinetics. *J Am Chem Soc* [Internet] 1947 [a.yer 2023 Oca 6]; 69: 2836-48.
- [25] Freundlich HMF. Over the adsorption in solution. *J Phys Chem* 1906; 57: 1100-7.
- [26] Wang J, Guo X. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere* 2020; 258: 127279.
- [27] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *J Am Chem Soc* [Internet] 1916 [a.yer 2022 Ağu 17]; 38: 2221-95.
- [28] Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal* 2010; 156: 2-10.
- [29] Temkin MI. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. *Acta Physicochim* 1940; 12: 327-56.

- [30] Ncibi MC. Applicability of some statistical tools to predict optimum adsorption isotherm after linear and non-linear regression analysis. *J Hazard Mater* 2008; 153: 207-12.
- [31] Kumar NS, Asif M, Al-Hazzaa MI. Adsorptive removal of phenolic compounds from aqueous solutions using pine cone biomass: kinetics and equilibrium studies. *Environmental Science and Pollution Research* 2018; 25: 21949-60.
- [32] Mahmoodi NM, Hayati B, Arami M, Lan C. Adsorption of textile dyes on Pine Cone from colored wastewater: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination* 2011; 268: 117-25.
- [33] Sen TK. Adsorptive Removal of Dye (Methylene Blue) Organic Pollutant from Water by Pine Tree Leaf Biomass Adsorbent. *Processes* 2023; 11: 1877.
- [34] Assefi M, Davar F, Hadadzadeh H. Green synthesis of nanosilica by thermal decomposition of pine cones and pine needles. *Advanced Powder Technology* 2015; 26: 1583-9.
- [35] Wang D, Xu H, Yang S, Wang W, Wang Y. Adsorption Property and Mechanism of Oxytetracycline onto Willow Residues. *Int J Environ Res Public Health* 2017; 15: 8.
- [36] Parus A, Gaj M, Karbowska B, Zembrzuska J. Investigation of acetaminophen adsorption with a biosorbent as a purification method of aqueous solution. *Chemistry and Ecology* 2020; 36: 705-25.
- [37] Mutavdžić Pavlović D, Ćurković L, Macan J, Žižek K. Eggshell as a New Biosorbent for the Removal of Pharmaceuticals From Aqueous Solutions. *Clean (Weinh)* 2017; 45.
- [38] Santaefemia S, Torres E, Mera R, Abalde J. Bioremediation of oxytetracycline in seawater by living and dead biomass of the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *J Hazard Mater* 2016; 320: 315-25.
- [39] Mutavdžić Pavlović D, Ćurković L, Mandić V, Macan J, Šimić I, Blažek D. Removal of Pharmaceuticals from Water by Tomato Waste as Novel Promising Biosorbent: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics. *Sustainability* 2021; 13: 11560.
- [40] Żółtowska-Aksamitowska S, Bartczak P, Zembrzuska J, Jesionowski T. Removal of hazardous non-steroidal anti-inflammatory drugs from aqueous solutions by biosorbent based on chitin and lignin. *Science of The Total Environment* 2018; 612: 1223-33.
- [41] Turk Sekulic M, Boskovic N, Slavkovic A, Garunovic J, Kolakovic S, Pap S. Surface functionalised adsorbent for emerging pharmaceutical removal: Adsorption performance and mechanisms. *Process Safety and Environmental Protection* 2019; 125: 50-63.
- [42] Ali MEM, Abd El-Aty AM, Badawy MI, Ali RK. Removal of pharmaceutical pollutants from synthetic wastewater using chemically modified biomass of green alga *Scenedesmus obliquus*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2018; 151: 144-52.

## KMSG Tabanlı Şebeke Bağlantılı Rüzgâr Enerji Sisteminin Sensörsüz MGNT ile Kontrolü

Emre AVCI\*

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

\*<sup>1</sup> emreavci@duzce.edu.tr

(Geliş/Received: 25/07/2024;

Kabul/Accepted: 24/09/2024)

**Öz:** Rüzgâr enerji sistemlerinde, değişken rüzgâr hızından maksimum bir şekilde faydalanarak sistem veriminin artırılması önemli konulardan biri haline gelmiştir. Bu çalışmada değişken rüzgâr hızları altında hız sensörü ve herhangi bir motor kontrol algoritması kullanmayan tek fazlı şebeke bağlantılı Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde generatör olarak Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG) tercih edilmiş ve çıkışında diyotlu doğrultucu devre kullanılmıştır. Değişken hızlarda şebeke bağlantısını sağlayabilmek için gerekli DA bara gerilimini yakalamak amacıyla DA-DA yükseltici devreye yer verilmiştir. Sistemde herhangi bir motor kontrol tekniğinin kullanılmaması ve PI (Proportional-Integral) ile PR (Proportional-Resonant) kontrolcülerıyla denetimlerin sağlanmasıyla sistem basit yapılı bir hale getirilmiştir. Ayrıca KMSG çıkışında kontrollü doğrultucu yerine diyotlu doğrultucu kullanılmasıyla sistem maliyeti ve boyutu nispeten azaltılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında önerilen 2kW nominal güce ve 400V bara gerilime sahip MGNT sistemi test edilmiştir. Sonuçlar sistemin performansını ve doğruluğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Rüzgâr enerjisi, MGNT, maksimum güç, evirici, şebeke.

### Sensorless MPPT Control of Grid-Connected Wind Energy System Based on PMSG

**Abstract:** In wind energy systems, increasing system efficiency by maximizing the usage of wind speed has become an important issue. In this study, a single-phase grid-connected Maximum Power Point Tracking (MPPT) system that does not use a speed sensor or any motor control algorithm under variable wind speeds is proposed. In the proposed system, a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is chosen as the generator, and a diode rectifier circuit is used at its output. To achieve the necessary DC bus voltage for grid connection at variable speeds, a DC-DC boost converter is included. The system is simplified by not using any motor control techniques and by employing PI and PR controllers for regulation. Additionally, the use of a diode rectifier instead of a controlled rectifier at the PMSG output reduces the system's cost and size. The proposed MPPT system, with a nominal power of 2kW and a bus voltage of 400V, was tested in simulation studies. The results demonstrated the system's performance and accuracy.

**Key words:** Wind energy, MPPT, maximum power, inverter, grid.

### 1. Giriş

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Atmosferik hareketlerdeki kinetik enerjinin türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanan bu enerji türü, fosil yakıt kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir [1,2]. Rüzgâr enerjisinin en büyük avantajlarından biri, atmosfere karbon salınımı yapmaması ve böylece iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri minimize etmesidir. Ayrıca, rüzgâr türbinlerinin kurulum maliyetleri giderek düşmekte ve teknoloji geliştikçe enerji üretim verimliliği artmaktadır. Bu durum, rüzgâr enerjisini hem ekonomik hem de çevresel açıdan cazip bir seçenek haline getirmektedir [3,4].

Rüzgâr enerjisinin önemi, enerji arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik bağlamında değerlendirildiğinde, birçok teknik avantaj sunmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin verimli çalışması, gelişmiş güç elektroniği sistemleri ve kontrol algoritmaları sayesinde mümkün olmaktadır [5,6]. Güç elektroniği devreleri, değişken rüzgâr hızlarına rağmen sabit frekans ve gerilimde elektrik üretimini sağlar. Ayrıca, rüzgâr türbinlerinde kullanılan mikroişlemci tabanlı kontrol sistemleri, rotor hızını ve kanat açısını sürekli olarak optimize ederek enerji dönüşüm verimliliğini artırır. Bu tür teknolojik ilerlemeler, rüzgâr enerjisinin güvenilir ve istikrarlı bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktadır [7,8].

Enerji şebekelerinin akıllı ve esnek hale getirilmesi açısından da Rüzgâr Enerji Sistemleri (RES) büyük önem taşır. Rüzgâr enerjisi santrallerinin şebekeye entegrasyonu, gelişmiş güç sistemleri analizleri ve senkronizasyon teknolojileri gerektirir. Ayrıca, rüzgâr enerjisi santrallerinin akıllı şebeke (smart grid) sistemlerine entegrasyonu,

\* Sorumlu yazar: [emreavci@duzce.edu.tr](mailto:emreavci@duzce.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-2086-1417

enerji depolama çözümleri ve dağıtık enerji kaynakları yönetimi açısından da önem arz eder. Bu teknik bileşenler, enerji arz güvenliğini artırarak ve şebeke stabilitesini sağlayarak, rüzgâr enerjisinin kritik bir yenilenebilir enerji kaynağı olmasını sağlar [9,10,11].

RES uygulamalarının birçoğunda Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) sistemlerine yer verilir. Bu sistemler türbinlerin her koşulda en yüksek verimle çalışmasını sağlamak için kritik bir rol oynar. Rüzgâr hızı ve yönü sürekli değiştiğinden, türbinlerin ürettiği elektrik gücü de dalgalanır. MGNT sistemleri, bu değişken koşullar altında türbinlerin optimum güç üretim noktasında çalışmasını sağlar [12]. Bu, rotor hızını ve kanat açısını dinamik olarak ayarlayarak gerçekleştirilir. MGNT algoritmaları, gerçek zamanlı veriler kullanarak güç eğrisini analiz eder ve türbinin çalışma noktasını sürekli olarak optimize eder. Bu sayede, enerji üretiminde maksimum verimlilik sağlanır ve enerji kaybı minimize edilir. MGNT sistemlerinin etkin kullanımı, rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam enerji üretimini artırırken, aynı zamanda şebeke stabilitesini de destekler [13,14].

MGNT sistemli uygulamalarda rüzgâr türbininden alınan güç bir generatör vasıtasıyla mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüştürülür. Kullanılan generatör türleri arasında Çift Beslemeli Asenkron Generator (ÇBAG) [15], Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generator (KMSG) [16,17] ve Sincap Kafesli Asenkron Generator (SKAG)[18] RES'lerde önemli bir yer tutar. Asenkron motorlar, sağlam yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle özellikle küçük ve orta ölçekli türbinlerde yaygın olarak kullanılır. ÇBAG, geniş bir hız aralığında yüksek verimlilik sunan ve rüzgâr türbinlerinin değişken rüzgâr koşullarında optimum güç üretmesini sağlayan bir türdür. ÇBAG sistemlerinde rotor devresine bağlı bir güç elektroniği dönüştürücüsü, rotor hızının ve güç akışının kontrolünü mümkün kılarken stator devresi şebekeye bağlanır. KMSG ise yüksek verimlilik ve güvenilirlik sunan, sabit mıknatıslar kullanan generatörlerdir ve genellikle büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinde tercih edilir. KMSG'nin avantajları arasında daha düşük bakım gereksinimi ve daha yüksek enerji yoğunluğu bulunur [19]. Günümüzde azalan maliyetler ile KMSG uygulamaları düşük güçlerde bile yaygın hale gelmektedir [20]. Bu generatör türlerinin her biri, belirli uygulama alanlarında rüzgâr enerjisi sistemlerinin performansını ve ekonomik sürdürülebilirliğini artırmak için kritik öneme sahiptir.

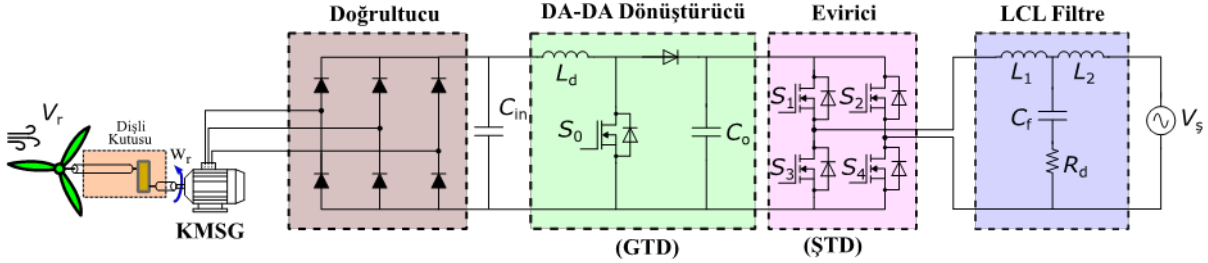
Şebeke bağlantılı MGNT'li RES'lerin kontrolü kullanılan generatör, doğrultucu devre ve evirici türüne göre değişiklik gösterebilmektedir [21]. Literatürde bazı çalışmalarda MGNT sistemi rüzgâr hız ölçümü gibi sensör gerektiren, sensör gerektirmeyen uygulamalarda ise tercih edilen generatörün parametreleri kullanılarak çeşitli makine kontrol tekniklerine yer verilmiştir. Ayrıca rüzgâr tribünü sonrasında konumlandırılan doğrultucu devresinin kontrollü veya kontrolsüz (diyotlu doğrultucu) olması da MGNT sisteminin çalışma prensibini etkilemektedir. Çalışma [22] ve [23]'de sırasıyla KMSG ve ÇBAG tabanlı MGNT sistemi rüzgâr hızı Yapay Sınır Ağı (YSA) tekniği ile tahmin edilerek kontrollü doğrultucu ve şebeke bağlantılı evirici ile oluşturulmuştur. Çalışma [24]'de KMSG ve kontrolsüz doğrultucu kullanılan MGNT sisteminde rüzgâr hız sensörü kullanılmamıştır, fakat Bulanık Mantık (BM) tabanlı MGNT algoritması maksimum gücün elde edilmesi için rüzgâr tribün çıkışındaki akım ve gerilimlerin ölçümüne ihtiyaç duymaktadır. Çalışma [25]'de, Kanat Ucu Hız Oranı (KUHO) tabanlı MGNT algoritması doğrusal olmayan adaptif bir kontrolcü ile çalışarak KMSG tabanlı gürbüz bir rüzgâr sistemini oluşturmuştur, fakat burada da MGNT algoritması rüzgâr hız bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Diğer bir çalışmada [26], Direkt Tork Kontrol (DTK) yöntemiyle KMSG tabanlı MGNT sistemi oluşturulmuştur. Bunun için ise hız sensörü kullanılmış ve generatör tarafında kontrollü doğrultucuya yer verilmiştir. Çalışma [27]'de, MGNT için hız ölçümü yapılarak Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) tekniği ile kontrollü doğrultucu tetiklenmiştir.

Bu çalışmada ise herhangi bir makine kontrol tekniği, hız ölçümü ve tahmini olmadan KMSG tabanlı şebeke bağlantılı, MGNT'li rüzgâr enerji sistemi oluşturulmuştur. KMSG çıkışında kontrolsüz doğrultucu kullanılarak yarı iletken ve sürücü maliyeti nispeten düşük bir sistem elde edilmiştir. Ayrıca sistemin kontrolünde PI (Proportional-Integral) ve PR (Proportional-Resonant) gibi doğrusal kontrolcülere yer verilmiş ve buda sistemin kontrolünü basit hale getirmiştir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde sisteminin mekanik kısmını oluşturan rüzgâr türbininin ve KMSG'nin karakteristiği ve çalışma prensipleri verilmiştir. Üçüncü bölümde ise MGNT sistemini çalışma prensibi ve sistemi oluşturan güç dönüştürücülerinin tasarım ve kontrolü detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, benzetim çalışmalarının sonuçlarına yer verilerek, son bölümde elde edilen bulgular irdelenerek gelecek yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

## 2. Mekanik Sistem Karakteristiği ve Çalışma Prensibi

Bu çalışmadaki MGNT'li şebeke bağlantılı rüzgâr enerji sisteminin blok diyagramı Şekil 1'deki gibidir. Rüzgâr türbininden alınan mekanik enerji şaft ve dişli kutusu yardımıyla KMSG döndürülerek generatör çıkışında bir gerilim elde edilir. Bu gerilim 3-fazlı köprü tip kontrolsüz doğrultucu ile doğrultularak Generatör Tarafı Dönüştürücü (GTD) olarak kullanılan yükseltici tip DA-DA dönüştürücünün girişine verilmiştir. Bu dönüştürücü

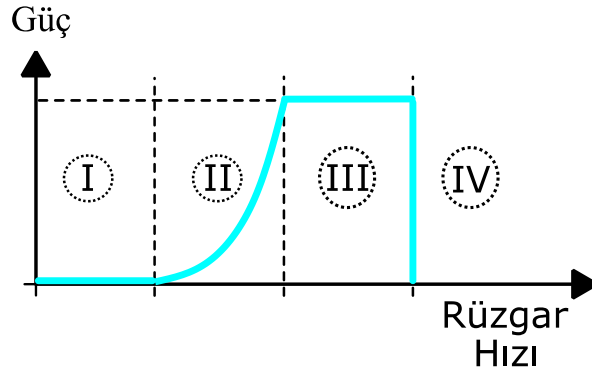
çıkışında ise sabit gerilim değerinde bir DA bara oluşturulur. Bu bara vasıtasıyla elde edilen elektriksel güç Şebeke Tarafı Dönüştürücü (ŞTD) olarak kullanılan tek fazlı H-köprü tipi eviricinin uygun tetiklenmesiyle şebekeye aktarılır.



Şekil 1. Tasarlanan Şebeke Bağlantılı RES güç devresi.

## 2.1. Rüzgâr türbin modeli

Rüzgâr türbinlerinden enerji üretiminin verimliliğini maksimize etmek ve türbin ömrünü uzatmak için Şekil 2'deki gibi dört farklı çalışma bölgesi ile kontrol edilirler. Birinci bölgede rüzgâr hızı generatörden elektrik enerjisi üretilemeyecek kadar düşüktür. Genellikle 3-4 m/s altındaki rüzgâr hızlarıdır. Bu bölgede türbin çalışmaz ve dolayısıyla güç üretimi yoktur. Türbinin çalışması için gerekli minimum rüzgâr hızına ulaşılan kadar beklenir. İkinci bölgede sistem, rüzgâr hızının artırılmasıyla üretilen gücün artması için MGNT ile kontrol edilir. Genellikle 3-4 m/s ile 12-15 m/s arasındadır. Bu bölgede rüzgâr hızı arttıkça üretilen güçte doğrusal olmayan bir şekilde artar. Ayrıca bu bölgede kanat eğim açısı optimal değerde tutulur. Türbin, bu bölgede maksimum verimlilikle çalışmaya zorlanır ve sistemin tüm bu hız aralığındaki hızlarında enerji üretimi optimize edilir. Üçüncü bölgede rüzgâr hızı türbin nominal değerinden fazla olduğu bölgedir. Burada kanat eğim açısı kontrol edilerek üretilen gücün nominalin üstüne çıkması engellenir. Son bölgede ise rüzgâr hızının sisteme zarar verecek seviyeler ulaştığı bölgedir. Bu durumda türbin güvenlik nedeniyle kapanır ve güç üretimi durur. Bu çalışmada ikinci bölgede çalışma ele alınacaktır.



Şekil 2. Rüzgâr türbininin farklı hızlardaki çalışma bölgeleri.

Rüzgârdan yakalanan güç ( $P_r$ ) Denklem 1'deki gibi formülize edilebilir. Bu formülde  $A$   $m^2$  cinsinden türbin kanat alanı,  $V_r$  rüzgâr hızı (m/sn),  $\rho$  hava yoğunluğu (yaklaşık  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ) ve  $C_p$  ise kanat uç hız oranı  $\lambda$  ve kanat açısı  $\beta$ 'nin bir fonksiyonu olan güç katsayısıdır. Bu güç katsayısı Denklem 2 ile belirlenebilir. Bu denklemde  $C_1 = 0,5$ ,  $C_2 = 116\lambda'$ ,  $C_3 = 0,4$ ,  $C_4 = 0$ ,  $C_5 = 5$ ,  $C_6 = 21\lambda'$  ve  $C_{67} = 0,01\lambda'$ 'dir. Buradaki  $\lambda'$  Denklem 3 ve Denklem 4 yardımıyla elde edilir [22, 25]. Bu denklemlerdeki  $w_r$  rotor açısal hızı ve  $R_b$  is metre cinsinden kanat yarıçapıdır. Bu formüllerden anlaşıldığı gibi türbinin üreteceği güç hızın küpü ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Örneğin rüzgâr hızı yarıya düştüğü durumda üretilen güçte 1/8 katına inecektir. Bu nedenle nominal hızın çok altlarındaki hızlarda türbin gücü çok düşük olacaktır.



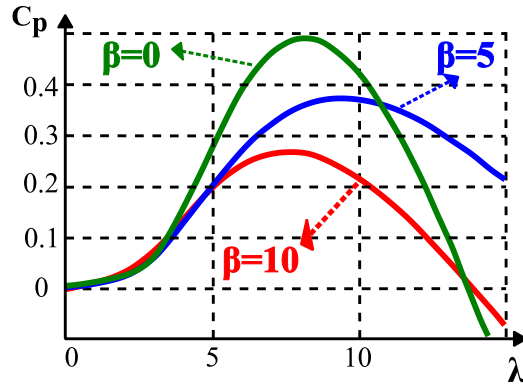
$$P_r = \frac{1}{2} A V_r^3 \rho C_p \quad (1)$$

$$C_p = C_1 (C_2 - C_3 \beta - C_4 \beta^x - C_5) e^{-C_6} + C_7 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{w_r R_b}{V_r} \quad (3)$$

$$\lambda' = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Kullanılan rüzgâr türbininin güç katsayısı  $C_p$  ile kanat uç hız oranı  $\lambda$  arasında ilişki Şekil 3'teki gibi farklı kanat açısı ( $\beta$ ) değerleri için verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi güç katsayısı yaklaşık 0,5, kanat uç hız oranı ise yaklaşık 8 olduğunda maksimuma ulaşmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada  $C_p$  ve  $\lambda$  değerleri nominal değerler alınarak kanat açısı değeri  $\beta=0$  olarak alınmıştır. Böylece nominal rüzgâr hızında türbin nominal gücünde çalışacaktır.



Şekil 3. Kullanılan rüzgâr türbininin farklı güç katsayısı, kanat açısı değeri ve kanat uç hızı arasındaki ilişki.

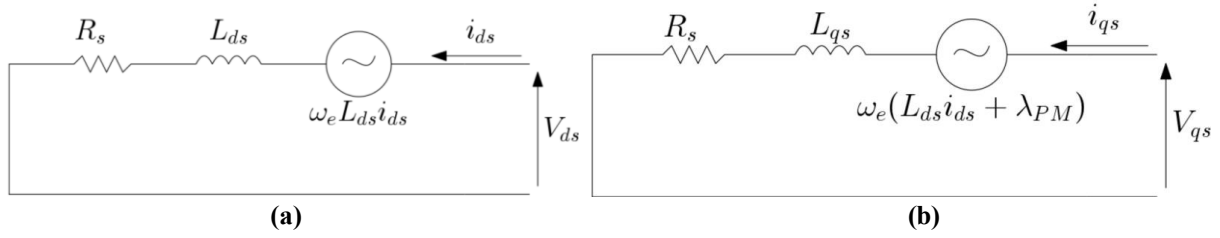
## 2.2. KMSG modeli

Bu çalışmada tercih edilen generatör tipi olan KMSG'nin d-q eksenlerindeki modeli Şekil 4'te verilmiştir. Bu modele göre d-q eksenlerinde stator gerilimleri ( $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ ) sırasıyla Denklem 5 ve Denklem 6'daki gibi yazılabilir. Burada  $R_s$  stator direnci,  $i_{sd}$  ve  $i_{sq}$  sırasıyla stator d-q ekseninde akımları,  $L_{sd}$  ve  $L_{sq}$  d-q ekseninde stator endüktansları,  $\omega_e$  elektriksel açısal frekans ve  $\lambda_{KM}$  kalıcı mıknatısların akısıdır. Elektromanyetik tork ( $T_e$ ) ise Denklem 7'deki gibidir. Bu denklemdeki  $N_p$  ise generatördeki kutup sayısını temsil etmektedir. Bu değerler kurulacak olan sistemin nominal gücü ile değişmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılacak olan 2kW gücündeki KMSG ve rüzgâr türbin parametreleri [7, 23, 25] çalışmaları ve Denklem 5, Denklem 6 ve Denklem 7'den hareketle Tablo 1'deki gibi alınmıştır.

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_e L_{sd} i_{sq} \quad (5)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_e (L_{sq} i_{sd} + \lambda_{KM}) \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3N_p}{4} (i_{sq} \lambda_{PM} - i_{sd} i_{sq} (L_{sd} - L_{sq})) \quad (7)$$



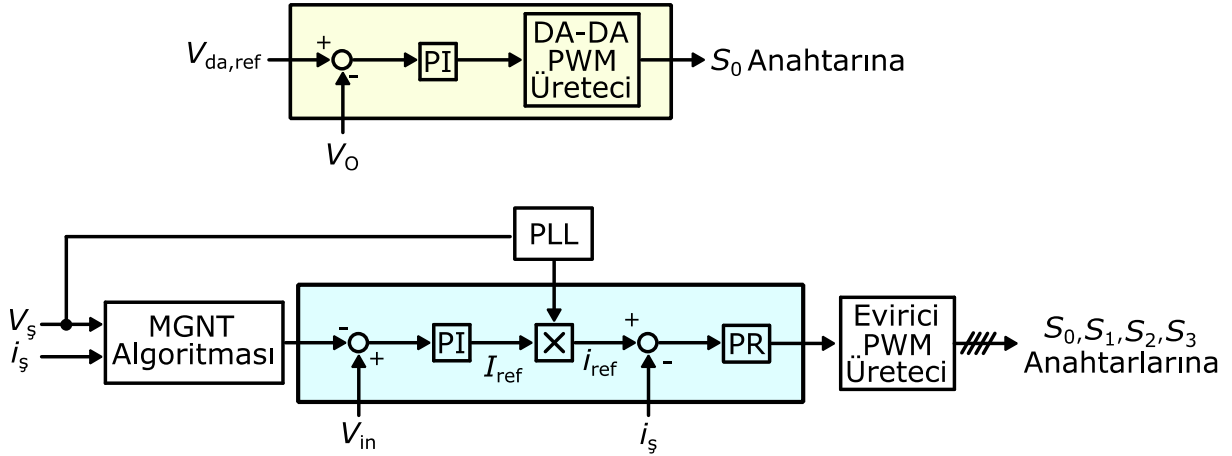
Şekil 4. KMSG'nin a) d eksen b) q eksen modeli [28].

Tablo 1. Kullanılan rüzgâr türbininin ve KMSG'nin parametreleri.

Parametre	Değer (birimi)
Rüzgâr türbin nominal çıkış gücü	2 (kW)
Rüzgâr türbin nominal rüzgâr hızı	12 (m/sn.)
Nominal Dönüş Hızı	1000 (dev/dk.)
Atalet momenti	1m (kg*m <sup>2</sup> )
KMSG stator direnci ( $R_s$ )	3m ( $\Omega$ )
KMSG endüktansı ( $L_{sd} = L_{sq}$ )	4m ( $\Omega$ )
KMSG kutup sayısı ( $N_p$ )	10
KMSG faz-faz geri emk tepe değer sabiti	200 (V)
KMSG atalet momenti	100m (kg*m <sup>2</sup> )

### 3. MGNT Sistemi ve Güç Dönüştürücüleri

Türbin tarafından yakalanan rüzgâr enerjisi KMSG'ye bağlı olan şaftı döndürmesiyle KMSG çıkışındaki mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Fakat değişken rüzgâr hızlarında KMSG'nin çıkış akım ve gerilim karakteristiğine uygun olarak maksimum gücün çekilmesi gerekir. Bunun için Şekil 5'deki gibi hız sensörsüz ve motor kontrol algoritması içermeyen MGNT sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde transfer fonksiyonu Denklem 8'deki gibi bir PI denetleyicisi ile DA-DA dönüştürücünün çıkış gerilimi ( $V_o$ ) istenilen DC bara geriliminde ( $V_{o,ref}$ ) sabit tutulmak istenir. Burada  $k_p$  oransal,  $k_i$  integratör katsayısıdır. Türbine gelen değişken rüzgâr hızlarında maksimum gücü çekebilme için ise klasik Saptır Gözle (Perturb & Observe) algoritması [29] sisteme adapte edilmiştir. Bu algoritma şebeke gücüne bakarak DA-DA girişindeki gerilimin ( $V_{in}$ ) kontrol edilmesi için bir referans gerilimi üretir. Üretilen bu referans gerilim bir PI denetçisinden geçerek şebeke akımı için genlik referansı ( $I_{s,ref}$ ) oluşturur. Oluşturulan genlik bir Phase-Locked Loop (PLL) algoritmasının şebeke gerilimine ( $V_s$ ) senkron ürettiği birim sinüs işaretlerle çarpılarak şebeke referans akımı ( $i_{s,ref}$ ) oluşturulur. Bu referans akımın takibi için ise Denklem 9'da verilen PR (Proportional-Resonant) kontrolcüsü [30] kullanılmıştır. Bu denklemlerdeki  $k_{pr}$  ve  $k_{ipr}$  sırasıyla kontrolcünün oransal ve integratör katsayılarıdır.  $w_{c1}$  birinci harmonik için kesim frekansı ve  $w_1$  şebeke geriliminin temel harmonik frekansdır.



Şekil 5. MGNT'li kontrol sistemi blok diyagramı.

$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (8)$$

$$PR(s) = k_{pr} + \frac{sk_{ipr}w_{c1}}{s^2 + 2w_{c1}s + w_1^2} \quad (9)$$

Kullanılan KMSG çıkışında elde edilecek gerilim eviricinin girişindeki DA baranın şebeke bağlantısını sağlaması için yeterli olmayacaktır. Bu nedenle generatör çıkışında Şekil 1'deki gibi konumlandırılan yükseltici tip bir DA-DA dönüştürücünün girişindeki gerilimi ( $V_{in}$ ) ve akımı ( $I_{in}$ ) görev periyodu ( $D$ ) ile çıkışında belirli bir gerilim ( $V_o$ ) ve akıma ( $I_o$ ) Denklem 10'da verilen formüldeki gibi dönüştürülür. Bu dönüştürme oranının geçerli olması dönüştürücünün Sürekli İletim Modunda (SİM), yani bobin akımının bir periyot boyunca sıfırın üzerinde olması gerekir. Ayrıca bobin akımının süreksiz olması generatör tarafından akımın kesintili olacağı anlamına gelecektir. Bu nedenle dönüştürücünün SİM'de çalışabilmesi için gereken minimum endüktans değeri üzerinde bir endüktans seçilmesi gerekir. Denklem 11'de SİM için kritik endüktans değeri  $L_{d,k}$  verilmiştir. Bu denkleme göre seçilecek olan endüktans  $L_d$  değeri  $L_{d,k}$  değerinin maksimum olacağı çalışma duruma göre belirlenirse tüm çalışma aralığında dönüştürücü SİM'de çalışacaktır. Bu nedenle Denklem 11'deki  $D$  değerinin minimum ve  $R$  yük değerinin maksimum olduğu durum ele alınır. Generatör ve rüzgâr türbin çalışma aralığı ele alındığında DA-DA dönüştürücünün çıkış gerilimi 400V, girişinin ise generatör tarafından üretilen maksimum 300V çalışma durumu için minimum görev periyodu  $D_{min} = 0,25$  olarak alınmıştır. DA-DA dönüştürücü çıkış empedansı olarak düşünülebilecek olan  $R$  yük değerinin maksimum olması dönüştürücü çıkış akımının minimum olduğu değere denk gelecektir. Bu değer ise sistemin minimum çalışma gücüdür ve bu güç değeri 100W olarak belirlendiğinden yola çıkılarak  $R = 1200\Omega$  olarak elde edilir. Bunlara göre ise  $L_d$  değeri Denklem 11 yardımıyla yaklaşık 12 mH olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü çıkışındaki kapasitenin ( $C_o$ ) seçiminde ise kesintisiz çalışma durum sınır değerinin üstünde bir değer seçilmelidir. Bu değer Denklem 12'de verilen formülle endüktans değerinin belirlenmesinde benzer şekilde belirlenmiştir. Tablo 2'de tasarlanan DA-DA dönüştürücünün değerleri verilmiştir.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

$$L_{d,k} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_{sw}} \quad (11)$$

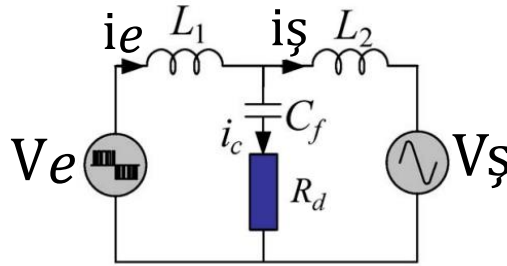
$$C_{o,k} = \frac{D}{2Rf_{sw}} \quad (12)$$

DA-DA dönüştürücü çıkışında konumlandırılan dört anahtarlı ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) H-köprü tip evirici, KMSG'den gelen gücü MGNT sistemi yardımıyla şebekeye aktaracaktır, fakat şebeke ile evirici arasına yüksek frekans harmoniklerini bastırmak için Şekil 1'deki gibi bir LCL tipi filtre bağlanmıştır. Bu filtrenin sebep olacağı  $f_r$  rezonans ve kapalı çevrim sistem kararlılığı için bir  $R_d$  direnci yardımıyla pasif sönümlenme sistemi yapılmıştır.

Şekil 6'da görüldüğü gibi evirici çıkış gerilimi ( $V_e$ ) vasıtasıyla üretilen kare dalga formundaki gerilim  $L_1$  ve  $L_2$  filtre bobinlerinden  $i_e$  ve  $i_s$  akımlarını akıtmaktadır. Böyle bir sistemin transfer fonksiyonu şebeke geriliminin ideal olduğu varsayımıyla Denklem 13'de verilmiştir. Bu denklem yardımıyla sistemin frekans cevabı oluşturularak rezonansı önleyecek olan  $R_d$  direnci belirlenmiştir. Ayrıca buradaki filtre elemanları belirlenirken Denklem 14'de verilen rezonans frekansı dikkate alınmalıdır. Bu rezonans frekansı  $10\omega_1 < f_r < f_{sw}/2$  aralığında tutulmaya çalışılmıştır. Burada verilen  $f_{sw}$  evirici anahtarlama frekansdır. Tüm bu analiz ve limitlerle tasarlanan eviricinin parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

$$\frac{i_s}{V_e} = \frac{C_f R_d s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + C_f (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (13)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 L C_f}} \quad (14)$$



Şekil 6. Pasif sönümlenmeli LCL tipi filtre modeli [31].

Tablo 2. Tasarlanan DA-DA dönüştürücü ve evirici parametreleri.

Parametre	Değer (birimi)
Dönüştürücü giriş ( $C_{in}$ ) ve çıkış ( $C_o$ ) kapasiteleri	1 (mF), 1 (mF)
Dönüştürücü endüktansı ( $L_d$ )	12 (mH)
Dönüştürücü anahtarlama frekansı ( $f_{sw}$ )	10 (kHz)
DA bara referans gerilimi	400 (V)
Evirici filtre bobinleri ( $L_1, L_2$ )	3 (mH), 3 (mH)
Evirici filtre kapasitörü ( $L_f$ ) ve sönüm direnci ( $R_d$ )	2 ( $\mu$ F), 6 ( $\Omega$ )
Şebeke temel harmonik açısal frekansı ( $\omega_1$ )	$100\pi$ (rad)
Şebeke nominal faz-nötr etkin gerilimi ( $V_s$ )	220 (V)

#### 4. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları

Benzetim çalışmaları, tasarlanan motor kontrol tekniği kullanılmayan ve sensörsüz KMSG tabanlı MGNT'li şebeke bağlantılı rüzgâr enerji sisteminin performansını doğrulamak için yapılmıştır. Tüm sistem PSIM benzetim programında tasarlanmış ve sonuçlar alınmıştır. Benzetim çalışmalarının tamamında kullanılan rüzgâr türbini, KMSG, DA-DA yükseltici tip dönüştürücü ve evirici parametreleri önceki bölümlerde verildiği gibidir. Ayrıca sistemin kontrolcü parametreleri ise Tablo 3'de özetlenmiştir. Şekil 7'de tüm sistemin benzetim görüntüsü verilmiştir. Şeklin üst kısmında sistemin rüzgâr türbini, KMSG, doğrultucu devre, DA-DA dönüştürücü devre, evirici, LCL filtre, sensör ve şebeke gibi donanım kısımları verilmiştir. Alt bölümünde ise sistemi kontrol edecek olan mikro kontrolcü ve onun içerisinde koşturulacak olan kontrol algortimasının şematik düzeni verilmiştir. Burada görüldüğü gibi sistem TI TMS320f28335 DSP kitine uygun ayrık zamanlı olarak tasarlanmıştır. Bu durumda, akım/gerilim örnekleme ve darbe genlik modülasyon sinyallerinin güncellemeleri için gecikmeler sisteme dahil edildiğinden (hesaplama geçikmesi süresi hariç) sonuçlar gerçek zamanlı çalışmaya daha yakın olacaktır.

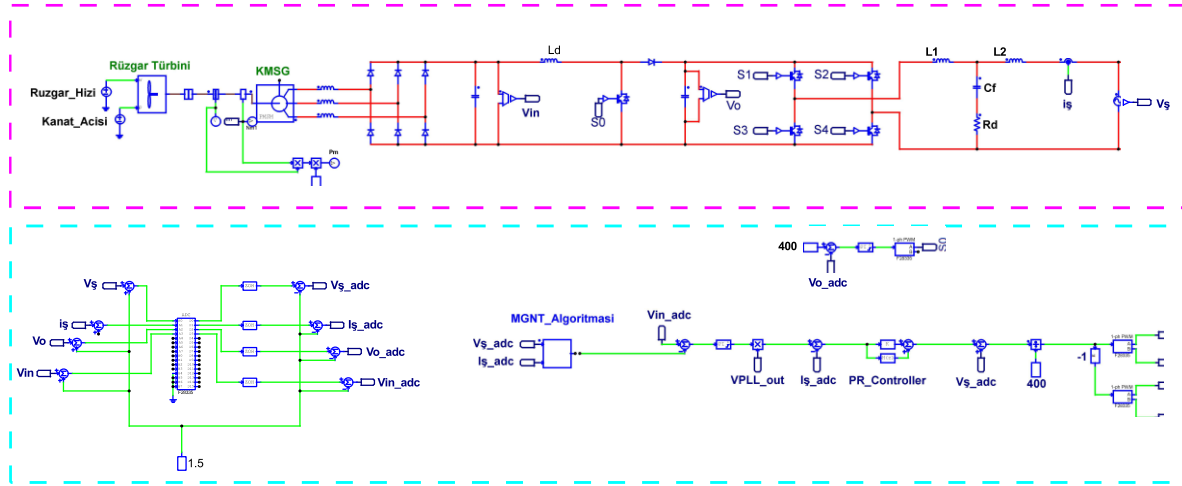
Sistemin ilk testi olarak sabit rüzgâr hızı altında performansı ele alınmıştır. Kanat açısı  $\beta=0$  derece ve rüzgâr hızı  $V_r=12$ m/s altında sistem çalıştırılarak elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. 12m/s rüzgâr hızında ve 0 derecelik kanat açısında sistemin üretmesi gereken güç nominal güç olan 2kW'dır. Şekil 8'de görüldüğü üzere

sistem yaklaşık bu değeri sağlayacak olan 12,8Atepe şebeke akım referansını üretmiş ve evirici bu referans akımı takip ederek 2kW'lık gücü şebekeye aktarmıştır. Ayrıca KMSG çıkış gerilimi, MGNT sisteminin ürettiği 175V referans geriliminde sabit tutulmuştur. Bunlar sistemde kullanılan basit MGNT algoritmasının çalışabildiğini ve kullanılan doğrusal kontrolcülerin yeterliliğini göstermektedir.

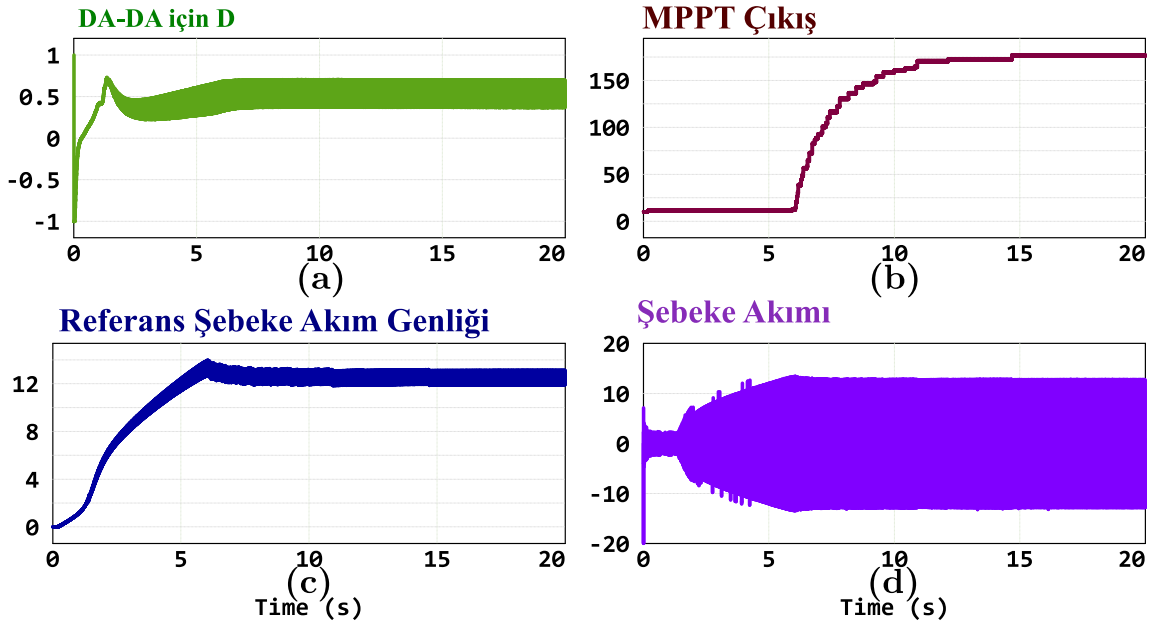
**Tablo 3.** Tasarlanan sistemdeki kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
DA-DA dönüştürücü için PI kontrolcüsü oransal katsayısı ( $k_p$ )	0,01
DA-DA dönüştürücü için PI kontrolcüsü integratör katsayısı ( $k_i$ )	0,01
PR kontrolcüsü oransal katsayısı ( $k_{pr}$ )	20
PR kontrolcüsü integratör katsayısı ( $k_{ipr}$ )	1000
Evirici için PI kontrolcüsü oransal katsayısı ( $k_p$ )	0,01
Evirici için PI kontrolcüsü integratör katsayısı ( $k_i$ )	0,02
MGNT algoritması adım aralığı	0,5

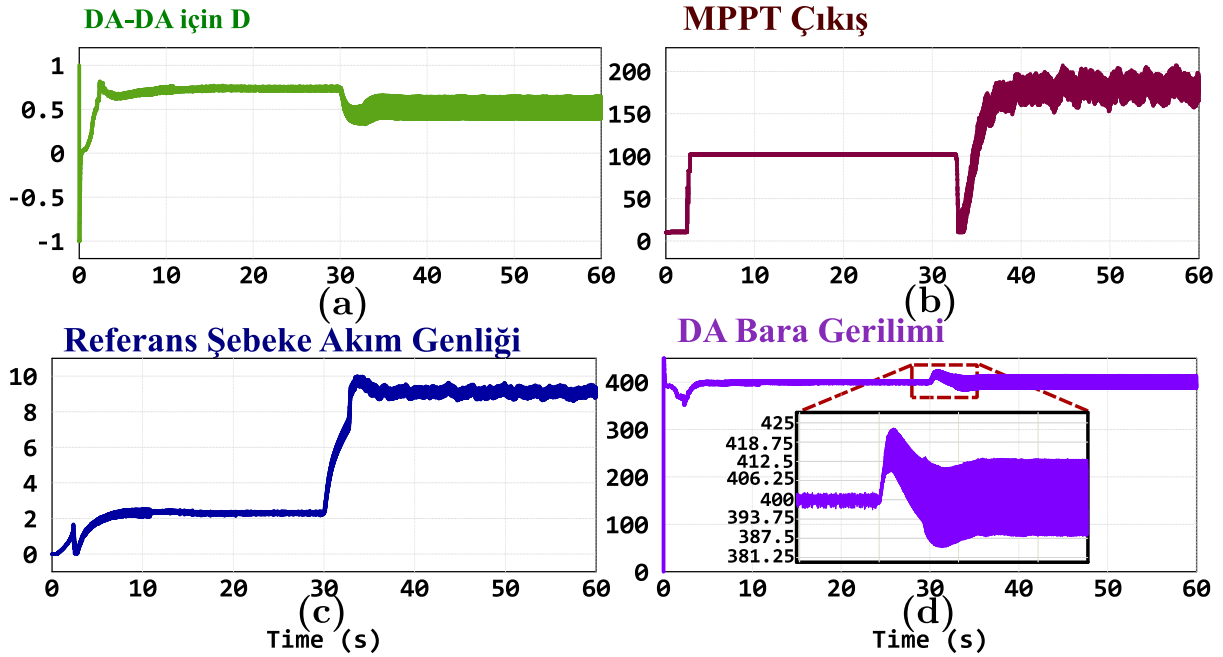
Diğer bir testte ise rüzgâr hızında ani bir değişim olduğunda sistemin kalıcı durum ve dinamik durum tepkileri ölçülmek istenmiştir. Bunun için kanat açısı değeri  $\beta=0$  değerinde ve 7m/s gibi çok düşük hızla başlayan rüzgâr hızı  $t=30$ . saniyede aniden 11m/s değerine düşürülmüştür. Bu durumdaki sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Burada 0-30 sn. aralığında rüzgâr hızı 7m/s olduğu için Denklem 1 kullanılarak gücün 12m/s rüzgârdakinin  $7^3/12^3$  katına inmesi beklenmektedir. Yani 7m/s rüzgâr hızında üretilecek güç yaklaşık 390W'dır. Bu güç için yaklaşık 2,5Atepe değerinde şebekeye akım basılmalıdır. Benzer şekilde 30. Saniyeden sonra hızın 11m/s'e çıkmasıyla birlikte üretilen güç yaklaşık 1500 kW civarına çıkmalıdır. Bunun için ise yaklaşık 9,8Atepe değerinde şebekeye akım basılmalıdır. Şekil 9'dan görüldüğü gibi bu akım referansları MGNT sistemi ile üretilmiştir. Ayrıca bu şekillerden görüldüğü üzere sistem farklı rüzgâr hızında stabil çalışmış ve ani rüzgâr değişimlerinde sistemin çalışması devam ettirilebilmiştir. Ek olarak DA bara gerilimi verilen farklı rüzgâr hızlarında 400V değerinde sabit tutulmuştur.



**Şekil 7.** Tasarlanan sistemin benzetim ekran görüntüsü.



Şekil 8. Sabit rüzgâr hızında sistemin a) DA-DA dönüştürücü için ürettiği görev periyodu D b) MGNT algoritmasının ürettiği referans gerilim (V) c) Şebeke akım referansı (A) d) Şebeke akımı (A) değişimleri.



Şekil 9. Değişken rüzgâr hızında a) DA-DA dönüştürücü için ürettiği görev periyodu D b) MGNT algoritmasının ürettiği referans gerilim (V) c) Şebeke akım referansı (A) d) DA bara gerilim (V) değişimleri.

## 5. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada rüzgâr enerjisinden elde edilen mekanik güç bir KMSG tipi generatörle elektrik enerjisine çevrilerek şebekeye aktarmayı amaçlamıştır. Değişken rüzgâr hızlarında da elde edilecek gücü maksimumda tutabilmek için hız sensörü ve herhangi bir motor kontrol tekniği içermeyen basit ve etkili bir MGNT yapısı önerilmiştir. Bu yapıda generatör çıkışında herhangi bir anahtarlama elemanı, dolayısıyla kapı sürücü devresi içermeyen diyotlu doğrultucu kullanılmıştır. Doğrultucu çıkışında DA-DA yükseltici tip bir dönüştürücü ile evirici

için gerekli olan bara gerilimi çeşitli rüzgâr hızlarında sağlanmıştır. Önerilen yapının performansı benzetim çalışmalarıyla doğrulanmıştır. Benzetim çalışmaları sonuçları sistemin değişken rüzgâr güçlerinde maksimum gücün şebekeye aktarılabilirdiğini göstermiştir. Gelecek çalışmalarda sistemde kullanılan P&O algoritmasının adaptif adım aralığında çalışması veya bu algoritmanın yerine daha gelişmiş algoritmaların kullanılarak sistem performansının artırılması hedeflenmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Afridi SK, Koondhar MA, Jamali MI, Alaas ZM, Alsharif MH, Kim MK, Mahariq I, Touti E ve diğerleri. Winds of Progress: An In-depth Exploration of Offshore, Floating, and Onshore Wind Turbines as Cornerstones for Sustainable Energy Generation and Environmental Stewardship. *IEEE Access* 2024; 12: 66147–66166.
- [2] Chen P, Thiringer T. Analysis of energy curtailment and capacity over installation to maximize wind turbine profit considering electricity price–wind correlation. *IEEE Trans on Sustainable Energy* 2017; 8(4): 1406-1414.
- [3] Geng Y, Li C, Cao Y, Chen H, Kuang Y, Ren X, Bai X. Cost analysis of air capture driven by wind energy under different scenarios. *J Mod Power Syst Clean Energy* 2016; 4(2): 275-281.
- [4] Yaramasu V, Wu B, Sen PC, Kouros S, Narimani M. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEEE* 2015; 103(5): 740-788.
- [5] Ouyang J, Li M, Zhang Z, Tang T. Multi-timescale active and reactive power-coordinated control of large-scale wind integrated power system for severe wind speed fluctuation. *IEEE Access* 2019; 7: 51201-51210.
- [6] Dursun EH, Koyuncu H, Kulaksiz AA. A novel unified maximum power extraction framework for PMSG based WECS using chaotic particle swarm optimization derivatives. *Eng Sci Technol Int J* 2021; 24(1): 158-70.
- [7] Mishra J, Pattnaik M, Samanta S. Drift-free perturb and observe MPPT algorithm with improved performance for SEIG-based stand-alone wind energy generation system. *IEEE Trans. Power Electron* 2019; 35(6): 5842-5849.
- [8] Chen W, Yang W, Qi H, Shi Z, Geng H. Coordinated power reserve control of wind farm for frequency regulation. *IEEE Access* 2023; 11: 55465-55473.
- [9] Wang X, Yang R, Shi Z, Cai X, Shi X, Chen Y. Coordinated low voltage ride-through of MMC-HVDC transmission system and wind farm with distributed braking resistors. *IEEE Access* 2022; 10: 87860-87869.
- [10] Ruiz C, Abad G, Zubiaga M, Madariaga D, Arza J. Wind turbine oriented solutions to improve power quality and harmonic compliance of ac offshore wind power plants. *IEEE Access* 2021; 9: 167096-167116.
- [11] Shutari H, Ibrahim T, Nor NB, Saad N, Tajuddin MF, Abdulrab HQ. Development of a novel efficient maximum power extraction technique for grid-tied VSWT system. *IEEE Access* 2022; 10: 101922-101935.
- [12] Chen W, Yang W, Chen Q, Li J, Geng H. Wind Speed Estimation for PMSG-Based WECS under Power Limit Control. *IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*; 12 May 2023; Hefei, China. pp. 1288-1292.
- [13] Du C, Du X, Tong C, Li Y, Zhou P. Stability analysis for DFIG-based wind farm grid-connected system under all wind speed conditions. *IEEE Trans Ind Appl* 2022; 59(2): 2430-2445.
- [14] Puchalapalli S, Singh B, Das S. Grid-interactive smooth transition control of wind-solar-dg based microgrid at unpredictable weather conditions. *IEEE Trans Ind Appl* 2024; 60(1): 1519-1529.
- [15] Chojaa H, Derouich A, Zamzoum O, Mahfoud S, Taoussi M, Albalawi H, Benboughenni H, Mosaad MI. A novel DPC approach for DFIG-based variable speed wind power systems using DSpace. *IEEE Access* 2023; 11: 9493-9510.
- [16] Shanmugam L, Palanimuthu K, Joo YH. Decentralized sampled-data control for stochastic disturbance in interconnected power systems with PMSG-based wind turbines. *IEEE Trans Cybern* 2023; 54(6): 3516-3525.

- [17] Aldin NA, Abdellatif WS, Elbarbary ZS, Omar AI, Mahmoud MM. Robust speed controller for PMSG wind system based on Harris Hawks optimization via wind speed estimation: a real case study. *IEEE Access* 2023; 11: 5929-5943.
- [18] Qin Y, Wang X, Wang H, Cai X, Lin B, Xu H. Effect of submarine cable capacitance on dynamic aggregation modeling of SCIG-based wind farm. *IEEE 4th International Conference on HVDC (HVDC)*; 6 Nov 2020; Xi'an, China. pp. 651-656.
- [19] Cheng M, Zhu Y. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review. *Energy Convers Manage* 2014; 88: 332-437.
- [20] Sun B, Chen Z, Gao C, Haddad A, Liang J, Liu X. A power decoupling control for wind power converter based on series-connected MMC and open-winding PMSG. *IEEE Trans Ind Electron* 2021; 69(8): 8091-8101.
- [21] Govinda CV, Udhay SV, Rani C, Wang Y, Busawon K. A review on various MPPT techniques for wind energy conversion system. *International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC)*; 28 Mar 2018; Chennai, India. pp. 310-326.
- [22] Sandeep V, Namala KK, Rao DN. Grid connected wind power system driven by PMSG with MPPT technique using neural network compensator. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*; 7 Apr 2016; Nagercoil, India. pp. 917-921.
- [23] Chojaa H, Derouich A, Chehaidia SE, Zamzoum O, Taoussi M, Elouatouat H. Integral sliding mode control for DFIG based WECS with MPPT based on artificial neural network under a real wind profile. *Energy Rep* 2021; 7: 4809-4824.
- [24] Putri AI, Ahn M, Choi J. Speed sensorless fuzzy MPPT control of grid-connected PMSG for wind power generation. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*; 11 Nov 2012; Nagasaki, Japan. pp 1-6.
- [25] Chen J, Yao W, Zhang CK, Ren Y, Jiang L. Design of robust MPPT controller for grid-connected PMSG-Based wind turbine via perturbation observation based nonlinear adaptive control. *Renewable Energy* 2019; 134: 478-95.
- [26] Tiwari R, Kumar K, Babu NR, Prabhu KR. Coordinated mppt and dpc strategies for pmsg based grid connected wind energy conversion system. *Energy Procedia* 2018; 145: 339-44.
- [27] Toumi I, Boulmaiz A, Meghni B, Hachana O. Robust variable step P&O algorithm based MPPT for PMSG wind generation system using estimated wind speed compensation technique. *Sustainable Energy Technol Assess* 2023; 60: 103420.
- [28] Penalba M, Sell NP, Hillis AJ, Ringwood JV. Validating a wave-to-wire model for a wave energy converter—Part I: The Hydraulic Transmission System. *Energies* 2017; 10(7): 977.
- [29] Oguz CB, Avci E, Ozturk SB. Analysis of PV power plant performance considering combination of different MPPT algorithms, shading patterns and connection types. *Eng Sci Technol Int J* 2023; 48: 101559.
- [30] Avci E, Ucar M. Proportional multi-resonant-based controller design method enhanced with a lead compensator for stand-alone mode three-level three-phase four-leg advanced T-NPC inverter system. *IET Power Electron* 2020; 13(4): 863-872.
- [31] Wu W, He Y, Tang T, Blaabjerg F. A new design method for the passive damped LCL and LLCL filter-based single-phase grid-tied inverter. *IEEE Trans Ind Electron* 2012; 60(10): 4339-50.





## Determination of Thermal Properties of Autoclaved Aerated Concrete Wall Sections Constructed with Distinct Mortars by the Experimental and Theoretical Data

Rukiye Koçkar Tuğla<sup>1\*</sup>, Orhan Emre Örgel<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Construction Department, Abana Sabahat Mesut Yılmaz Vocational School, Kastamonu University, Kastamonu, Türkiye

\*<sup>1</sup> rkockar@kastamonu.edu.tr, <sup>2</sup> orhaneorgel@gmail.com

(Geliş/Received: 06/05/2024;

Kabul/Accepted: 24/09/2024)

**Abstract:** This study investigated the thermal properties of autoclaved aerated concrete (AAC) wall sections constructed with distinct mortars. Within the scope of the study, four distinct wall sections of 25x25x5cm dimensions were created using AAC special adhesive mortar, cement mortar, lime mortar and cement-lime mortar. The thermal conductivity ( $\lambda_{EXP}$ ) that was determined by the heat flow meter (HFM) method and bulk density ( $\rho_{EXP}$ ) of each wall section was determined in the laboratory. Specific heat values ( $c_{EXP}$ ) of mortars and aerated concrete material were determined experimentally in the study. The thermal diffusivity value ( $\alpha_{EXP}$ ), thermal effusivity value ( $e_{EXP}$ ) and volumetric heat capacity ( $VHC_{EXP}$ ) of each wall sample were calculated using the experimental data obtained in the laboratory. In addition,  $\alpha_{TEO}$ ,  $e_{TEO}$  and  $VHC_{TEO}$  of each wall sample were calculated theoretically using the thermal conductivity, bulk density and specific heat value given in the literature and standards for the same wall sections. In the study, experimental data was compared to the theoretical data. As a result, the thermal properties of walls constructed with distinct mortars and thermal differences formed in the walls due to the effect of these mortars could be determined with experimental data. However, it was observed that theoretical data were insufficient to detect these thermal differences.

**Keywords:** Autoclaved aerated concrete wall, thermal conductivity, specific heat value, thermal diffusivity, thermal effusivity.

### Farklı Harçlarla İnşa Edilen Gazbeton Duvar Kesitlerine Ait Isıl Özelliklerin Deneysel ve Teorik Verilerle Belirlenmesi

**Öz:** Bu çalışmada, farklı harçlar ile inşa edilmiş gaz beton duvar kesitlerinin ısıl özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında gaz beton özel yapıştırma harcı, çimento harcı, kireç harcı ve çimento-kireç harcı kullanılarak 25x25x5cm boyutunda dört farklı duvar kesiti oluşturulmuştur. Her bir duvar kesitinin, ısıl iletkenlik hesap değeri ( $\lambda_{EXP}$ ) ısı akış ölçer (HFM) yöntemiyle ve birim hacim ağırlığı ( $\rho_{EXP}$ ) standartlarda tariflenen şekliyle laboratuvarında elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan harçların ve gaz beton malzemenin özgül ısı değeri ( $c_{EXP}$ ) deneysel olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında elde edilen bu deneysel veriler kullanılarak her duvar örneğinin deneysel ( $\alpha_{EXP}$ ) termal efusivite/ısıl dağınıklık ( $\alpha_{EXP}$ ), termal efusivite/ısıl dağınıklık ( $e_{EXP}$ ) değeri ve hacimsel ısı kapasitesi ( $VHC_{EXP}$ ) hesaplanmıştır. Aynı duvar kesitleri için literatürde ve/veya standartlarda verilen teorik ısıl iletkenlik hesap değeri, birim hacim ağırlığı ve özgül ısı değeri kullanılarak her bir duvar örneğinin termal difüzyivite/ısıl yayınlılık ( $\alpha_{TEO}$ ), termal efusivite/ısıl dağınıklık ( $e_{TEO}$ ) değeri ve hacimsel ısı kapasitesi ( $VHC_{TEO}$ ) teorik olarak belirlenmiştir. Çalışmada deneysel veriler ile teorik veriler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; farklı harçlarla inşa edilmiş duvarların ısıl özellikleri ve bu harçların etkisiyle duvarlarda oluşan ısıl farklılıklar deneysel veriler ile tespit edilebilmiştir. Teorik verilerin ise bu ısıl farklılıkları tespit etmede yetersiz kaldığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Gaz beton duvar, ısıl iletkenlik hesap değeri, özgül ısı değeri, ısıl yayınlılık, ısıl dağınıklık.

#### 1. Introduction

Today, many masonry building materials such as brick, pumice concrete block and autoclaved aerated concrete are used in the construction of building walls. The mechanical, physical and thermal properties are decisive in choosing these building materials. Autoclaved aerated concrete (AAC), which has low density and low thermal permeability due to its light and porous structure, is a widely used building material [1-2]. Autoclaved aerated concrete is defined as lightweight concrete formed by lightening a mixture prepared with finely ground siliceous aggregate and an inorganic binder (lime/cement) by adding a pore-forming agent and hardening this mixture through steam curing [3-4]. Autoclaved aerated concrete consists of approximately 70%-80% pores by volume. Thanks to its high porosity, autoclaved aerated concrete has a low density compared to other wall-filling materials [5], and several of its physical properties vary depending on density. The density of autoclaved aerated concrete has values in the range of 300 kg/m<sup>3</sup>-1800 kg/m<sup>3</sup> [6-7]. However, there are also aerated concretes with

\* Sorumlu yazar: [rkockar@kastamonu.edu.tr](mailto:rkockar@kastamonu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9731-4206, <sup>2</sup> 0009-0007-1215-6415

different physical, mechanical, and thermal properties formed by adding different materials in the literature [8-10].

Autoclaved aerated concrete also has a lower thermal conductivity value than other masonry wall materials. The calculated thermal conductivity value of autoclaved aerated concrete building slabs, according to TS EN 771-4, used with distinct mortars and different joint thicknesses, is in the range of 0.11 W/mK-0.29 W/mK [11]. It is known that this material with thermal conductivity has a higher thermal performance than other wall-filling materials; that is, its thermal resistance is better. For this reason, walls built with autoclaved aerated concrete are expected to have high energy performance and low energy consumption. However, there are certain other factors that affect this situation. The calculated thermal conductivity value is affected by the physical properties of the material, such as density, moisture content, and porosity [12]. There is a direct relationship between density and the calculated thermal conductivity value. In particular, the thermal conductivity value of building materials with a density below 3000 kg/m<sup>3</sup> shows a positive correlation [13]. In addition, defects such as air leaks and thermal bridges caused by labor faults and material deterioration also negatively affect the thermal performance of the wall [14]. The properties of the binding material used in mortar joints on the walls also change the total thermal performance of the wall. Thus, in order to determine the thermal performance of a building wall, it is necessary to know the thermal properties of both the masonry block material (aerated concrete) and the mortar materials used in its joints. But there is still very little information about the thermal properties of building materials [1, 15]. Compared to the thermal conductivity value, it is more difficult to find the thermal properties of materials, particularly properties such as specific heat, thermal diffusivity value, and volumetric heat capacity, in the literature. The specific heat values of building materials are expressed in general round numbers in the literature and standards. Moreover, the specific heat value of building materials is given in a wide range as 300 J/kgK-2500 J/kgK [13]. In the TS EN 1745 standard, the specific heat value of all building materials and mortars, including aerated concrete, is stated as 1000 J/kgK. The specific heat value given in the literature for autoclaved aerated concrete is in the range of 837 J/kgK-1050 J/kgK [5, 15-20].

The lack of reliable technical information about the thermal properties of materials and the energy performance of autoclaved aerated concrete walls [15] leads to differences between design thermal values and actual thermal values. Therefore, this study, which was conducted to determine the essential physical and thermal properties of autoclaved aerated concrete and the walls built with aerated concrete, is significant in the sense that it will contribute to overcoming the lack of technical information in the literature. This study examines the thermal performance of autoclaved aerated concrete walls constructed using distinct mortars. Basic thermophysical properties such as thermal conductivity ( $\lambda$ , W/mK), specific heat value ( $c$ , J/kgK), and bulk density ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>) of representative autoclaved aerated concrete walls built as part of this study were determined by laboratory experiments. Using the experimental data obtained and theoretical data taken from the literature/standards, important thermal variables of each wall section (such as thermal diffusivity, thermal effusivity, and volumetric heat capacity) were calculated. The thermal performances of autoclaved aerated concrete wall sections produced with distinct mortars were compared based on the results. According to the reviewed literature, the thermal conductivities of mortars and aerated concrete block material were determined separately in previous studies. What makes this study different is the determination of thermal conductivity calculation values over the wall cross-section. Another thing is the experimental determination of the specific heat value of aerated concrete and each mortar material. Specific heat value has constituted a basic source for the literature. The study is considered to be important in this respect.

## 2. Materials and Methods

The autoclaved aerated concrete wall sections were created using autoclaved aerated concrete wall-filling material and four distinct mortars as part of this study. Among the mortars commonly used as joint filling material today, the types of mortars preferred in this study are autoclaved aerated concrete special adhesive mortar, cement mortar, lime mortar, and cement-lime added mortar [21]. The binding material-sand ratio in the mortar mixture was kept constant at 1/3. The water ratio used in the study varied according to the consistency of the mortar. The mixing ratios of all materials used in the study are presented in Table 1.










**Table 1.** Material mixing ratios of the autoclaved aerated concrete wall sections

Materials	Material Properties	Sand (0-4 mm)	Cement	Lime	Adhesive mortar of AAC	Water
		kg	kg	kg	kg	kg
Autoclaved aerated concrete (AAC)	The sample of aerated concrete	-	-	-	-	-
AAC adhesive mortar (AACM)	Cement-based autoclaved aerated concrete mortar	-	-	-	5.0	1.70
Cement mortar (CM)	Cem IV/B 32.5 R pozzolanic cement	6.0	2.0	-	-	1.45
Lime Mortar (LM)	Slaked lime	6.0	-	2.0	-	1.20
Cement+lime mortar (CLM)	The cement: lime ratio of 3/1	6.0	1.33	0.67	-	1.45

Note: Mixing ratios for AAC volume (1 m<sup>3</sup>).

Autoclaved aerated concrete was cut into equal pieces of 12x25x5 cm (width x length x thickness) with cutting in the laboratory. After cutting, no visible cracks were observed, and very fine rough surfaces were created on the side edges of the autoclaved aerated concrete to increase adhesion. A basic wall section was formed by filling the joint between two rough surfaces with mortar material with a thickness of 10 mm [22], nearly. This procedure was implemented on each wall section sample, which was constructed using four distinct mortars. Furthermore, those mortar samples were produced from each mortar variant with a size of 25x25x5 cm. Table 2 shows the details of the mortar samples and the wall sections crafted utilizing these mortars.

**Table 2.** Definitions, photographs, and codes of autoclaved aerated concrete wall sections and mortars

Material Code	Material Description	Material View	Material Code	Material Description	Material View
AAC	The autoclaved aerated concrete materials		-	-	-
AACM	Adhesive mortar of autoclaved aerated concrete		W1	The wall sample section (W1) is constructed of autoclaved aerated concrete (AAC) and adhesive mortars (AACM).	
CM	Cement mortar		W2	W2 is constructed of autoclaved aerated concrete (AAC) and cement mortars (CM).	
LM	Lime Mortar		W3	W3 is constructed of autoclaved aerated concrete (AAC) and lime mortars (LM).	
CLM	Cement+lime mortar		W4	W4 is constructed of autoclaved aerated concrete (AAC) and cemen+lime mortars (CLM).	

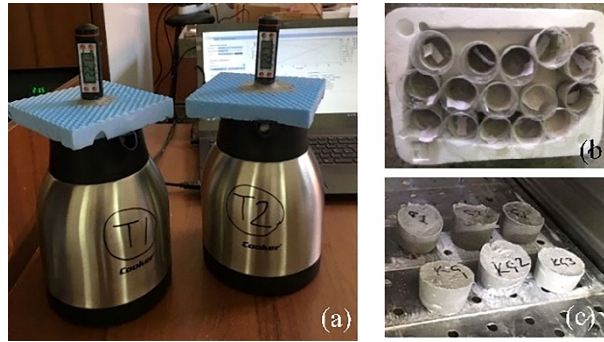
This study has determined various thermophysical properties such as thermal conductivity, specific heat value and bulk density for both the mortars and the autoclaved aerated concrete wall sections produced as part of the study. The thermal conductivity of wall sections was measured by the HFM 300 coded “heat flow meter” method in the Civil Engineering Laboratory of Kastamonu University. In the HFM 300 test method, the thermal conductivity is measured on samples of 30x30x5 cm in size. In order to make the produced samples ready for measurement in the HFM test method, the edges of the wall were covered with insulation material to prevent heat loss around the samples (Figure 1). The experiment was then initiated by putting the wall section sample within the HFM test method according to the standard BS EN 12667 [23] (Figure 1).



**Figure 1.** Heat flow meter method (coded HFM 300)

The wall sections were tested using the HFM 300 coded heat flow meter method, and thermal conductivity ( $\lambda$ , W/mK) and thermal transmittance value ( $U$ , W/m<sup>2</sup>K) results were obtained. The thermal resistance value ( $R$ , m<sup>2</sup>K/W) of the wall sections was also calculated ( $R=1/U$ ) [11] by employing these  $U$  values.

The specific heat value of autoclaved aerated concrete and mortar materials was determined with a simple experimental setup prepared in laboratory conditions, taking the TSE 4048 standard [24] as a reference [25]. An insulated calorimeter box that prevents heat transfer, with the features specified in the TSE 4048 standard, is required to set up a test device for measurement specific heat value. The basic principle in setting this experimental setup is Energy Conservation, the first law of Thermodynamics [26]. The experimental setup involved the utilization of two hot water thermoses, each with a capacity of 1500 ml. A lid was created using insulating material to cover the mouths of the thermoses and prevent heat loss. A thermometer that can monitor the temperature change of the water in the thermos was positioned centrally within this lid. Figure 2(a) shows the specific heat experimental setup. The material samples of the specific heat value to be determined must be sized enough to fit into the experimental setup. Figure 2(b) shows that the autoclaved aerated concrete material and mortar samples were prepared for the experimental setup of the specific heat value. The initial masses of the prepared samples were measured, and the samples were subsequently placed in an oven at a temperature of 40°C until their material masses reached a stable state (Figure 2(c)). Upon reaching a stable mass, the materials were kept in the oven at 60°C for a duration of 24 hours. The materials taken from the oven were placed in the experimental setup filled with 1/2 liter of distilled water. The temperature of the water in the experimental setup was checked at 2-minute intervals. The experiment was concluded following three consistent temperature measurements. The last temperature that remained stable for three measurements was taken as the equilibrium temperature of the system. The data has been used in Equation 1 to calculate the specific heat value of the samples [24, 25]. Figure 2 shows the photographs of the experimental setup and test samples.

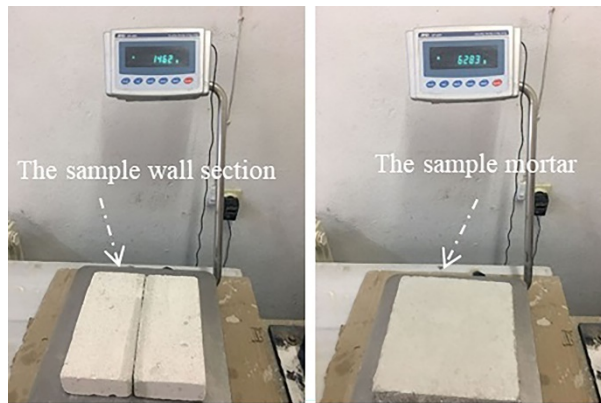


**Figure 2.** Views of the calorimeters (a) that were used in the experiments and test samples (b, c) for the specific heat value

$$M_s c_s \Delta T_s = M_n c_n \Delta T_n \quad (1)$$

Where;  $M_s$ : the mass of the calorimeter water (g);  $c_s$ : the specific heat capacity of the calorimeter water (cal/g°C);  $\Delta T_s$ : the temperature change undergone by the calorimeter water (°C),  $M_n$ : the mass of the sample (g);  $c_n$ : the specific heat capacity of the sample (cal/g°C);  $\Delta T_n$ : the temperature change undergone by the sample (°C).

The bulk density of a material represents the ratio of the mass to the bulk volume of that particular material [27]. The bulk density of distinct mortars and autoclaved aerated concrete wall sections produced with them was determined by using RILEM (1980) [27] and TS EN 1936 (2007) [28] standards. Figure 3 shows the determination of the mass of the test samples.



**Figure 3.** Determination of the mass of autoclaved aerated concrete wall sections and distinct mortars.

The thermal conductivity value obtained as a result of the experiments was used to determine important thermal parameters such as the thermal diffusivity ( $\alpha$ , m<sup>2</sup>/s), thermal effusivity ( $e$ , Ws<sup>1/2</sup>/m<sup>2</sup>K), and volumetric heat capacity (VHC, J/m<sup>3</sup>K) of the wall sections. In addition, theoretical  $\alpha$ ,  $e$ , and VHC values were determined for the materials forming the wall sections used in the study, employing data obtained from the literature and/or standards. Both experimental and theoretical  $\alpha$ ,  $e$ , and VHC values of the wall sections were calculated with Equation 2, Equation 3, and Equation 4, respectively.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \times \rho} \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (3)$$

$$\text{VHC} = \rho \cdot c \quad (4)$$

Where  $c$ : specific heat capacity value (J/kgK),  $\rho$ : bulk density (kg/m<sup>3</sup>), and  $\lambda$ : thermal conductivity (W/mK)

### 3. Results and Discussion

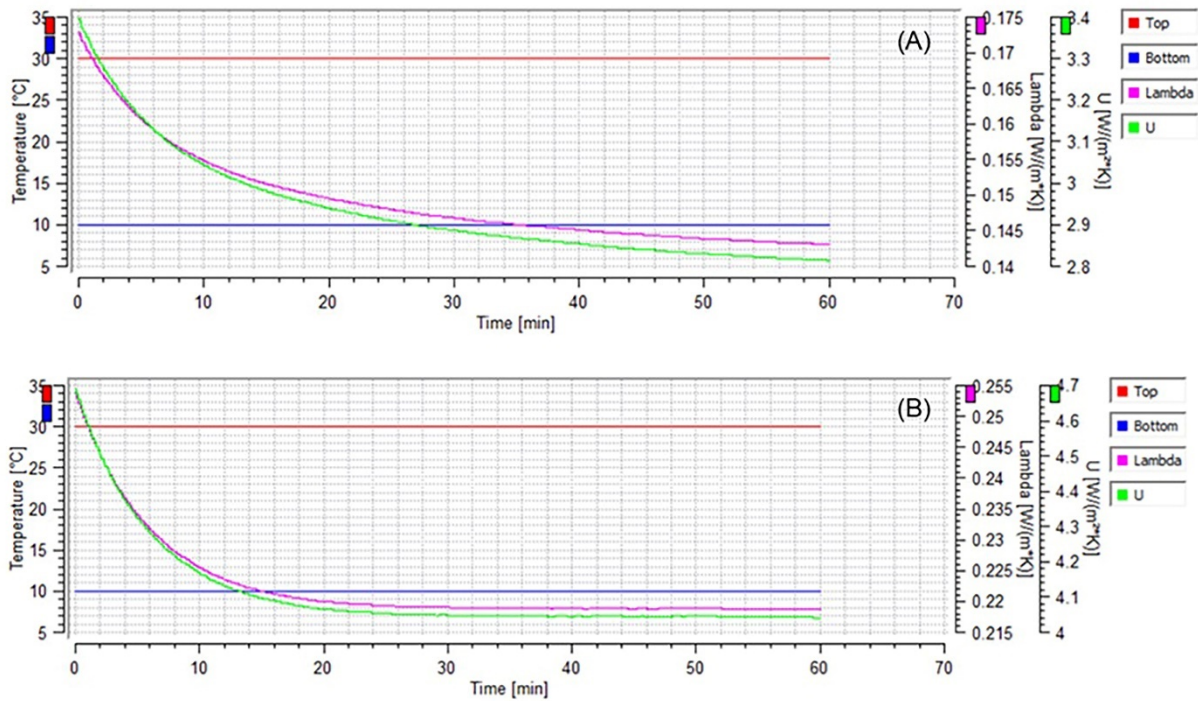
Thermophysical properties such as thermal conductivity value, specific heat, and bulk density of the wall sections constructed with autoclaved aerated concrete and distinct mortars used in the study were determined from laboratory experiments.

The thermal conductivity ( $\lambda_{EXP}$ , W/mK) and thermal transmittance value ( $U_{EXP}$ , W/m<sup>2</sup>K) of the wall sections were determined by experiments conducted in the laboratory environment, and the thermal resistance value of the wall sections ( $R_{EXP}$ , m<sup>2</sup>K/W) was calculated using these data (Table 3). According to these data, the thermal conductivity of jointless autoclaved aerated concrete (AAC) prepared as a single piece was determined as 0.116 W/mK, and the thermal transmittance value was identified as 2.286 W/m<sup>2</sup>K. The thermal properties of the wall sections, which were prepared in two pieces and joined by applying a thin layer of mortar between them, were also determined. The  $\lambda_{EXP}$  and  $U_{EXP}$  values of the wall section coded as W2 and W3 are presented respectively as graphics in Figure 4 (A) and (B). As a result of the experiments, the effect of mortars on the thermal performance of the autoclaved aerated concrete wall section was determined. Based on the acquired data, the thermal resistance of the wall section (W1) constructed employing autoclaved aerated concrete special adhesive mortar was determined as 0.431m<sup>2</sup>K/W. The wall section was observed to have better thermal resistance than other wall sections. The thermal resistance values of the wall sections with codes W2 and W4 using cement and cement-lime based mortar were determined as 0.355 m<sup>2</sup>K/W and 0.359 m<sup>2</sup>K/W, respectively. The W3-coded wall section made with lime mortar was the wall section with the lowest thermal resistance with a value of 0.248 m<sup>2</sup>K/W. There was a significant increase in the thermal conductivity of the W3-coded lime mortar wall section compared to other wall sections. Thermal conductivity is a property that varies depending on the density, pore structure, and moisture content of the material [1, 9] and is also affected by problems in the material (such as air leakage, thermal bridge). The adherence between lime mortar and autoclaved aerated concrete was weaker than other wall sections. This led to air leakage at the joint section of the lime mortar wall section, in addition to causing the thermal conductivity and thermal transmittance values to be higher. Furthermore, the moisture content of the W3-coded wall section was determined as 17.53% and the moisture content of the lime mortar (LM) was identified as 29.70% (Table 5). The thermal conductivity is a value affected by the moisture content of the material. According to Narayanan et al., a 1% increase in the mass moisture content of a material increases the thermal conductivity by approximately 42% [12].

**Table 3.** Definition of materials used in AAC wall samples in terms of their thermal properties such as thermal transmittance value (U), thermal resistance (R), and thermal conductivity ( $\lambda$ ).

Material Code	Thermal transmittance	Thermal conductivity	Thermal resistance	The thermal conductivity was taken from TS 825	The sequence number in TS 825
	$U_{EXP}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\lambda_{EXP}$ (W/mK)	$R_{EXP}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$\lambda_{TS825}$ (W/mK)	
AAC	2.286	0.116	0.437	0.130	6.1.2
W1	2.322	0.118	0.431		
W2	2.814	0.143	0.355	0.200	6.1.1
W3	4.041	0.218	0.248		
W4	2.783	0.141	0.359		

The specific heats of the autoclaved aerated concrete and four distinct mortars used in the study were determined through experiments carried out in the laboratory. The data obtained are presented in Table 4. According to the test results, the specific heat value ( $c_{EXP}$ ) of autoclaved aerated concrete was approximately 1020 J/kg°C; the specific heat of cement mortar, lime mortar, and cement-lime mortars were determined to be approximately 998 J/kgK, 848 J/kgK, and 819 J/kgK, respectively. When literature data and standards are examined, one finds different specific heat information for the autoclaved aerated concrete and mortars used in the study. Although the specific heat value ( $c_{TEO}$ ) commonly given in the literature for autoclaved aerated concrete is 1000 J/kgK [5,16,19], there are also publications stating it in the range of 837-1050 J/kgK [15, 17,18, 20]. The specific heat value of autoclaved aerated concrete special adhesive mortar (AACM) could not be accessed as part of the literature research.



**Figure 4.** The thermal conductivity ( $\lambda_{EXP}$ ) and thermal transmittance value ( $U_{EXP}$ ) of W2(A) and W3(B).

The specific heat of AACM-coded mortar was determined as 692 J/kgK as a result of the experimental study. In the TS EN 1745 standard, the specific heat value for all masonry materials is 1000 J/kgK. To research the thermal properties and thermal performances of materials, the reference specific heat value of the material must be ascertained. So, it is understood that these data need to be included in the literature.

**Table 4.** Specific heat values of autoclaved aerated concrete and distinct mortars

Code	Specific Heat Value (c, J/kgK)						
	Experimental data ( $c_{EXP}$ )	[5]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]
AAC	1020	1000	1050	1000	837	840	1000
AACM	692	-	-	-	-	-	-
CM	998	-	-	1000	837	840	837
LM	848	-	-	1000	-	840	-
CLM	819	-	-	1000	-	840	840

The bulk density information of aerated concrete, mortar plates, and wall sections used in the study is given in Table 5. According to these data, the density of jointless autoclaved aerated concrete (AAC) constructed as a single piece was determined as 419 kg/m<sup>3</sup>. The bulk density of the CM-coded cement mortar, the CLM-coded mortar, and the LM-coded mortar were determined as 2011 kg/m<sup>3</sup>, 1960 kg/m<sup>3</sup>, and 1754 kg/m<sup>3</sup>, respectively. Within the array of the mortar plates, it was noted that those containing cement components manifested a higher density by anticipated outcomes. Again, upon further examination of the wall sections, it was observed that those constructed with high-density mortars exhibited elevated density levels. These density data obtained through experiments were similar to literature data [11, 17, 18, 29].

As a result of the study, experimental ( $\alpha_{EXP}$ ) and theoretical ( $\alpha_{TEO}$ ) thermal diffusivity value ( $\alpha$ , m<sup>2</sup>/s), thermal effusivity value ( $e$ , W s<sup>1/2</sup>/m<sup>2</sup>K), and volumetric heat capacity (VHC, J/m<sup>3</sup>K) of aerated concrete, mortars and wall sections were calculated by using the thermophysical properties obtained experimentally and taken from the standards. The thermal conductivity value of the mortars could not be determined as experimental data. So, the theoretical  $\lambda_{TEO}$  values given in [11] were used to calculate  $\alpha_{EXP}$ ,  $e_{EXP}$ , and  $VHC_{EXP}$  values for mortars.

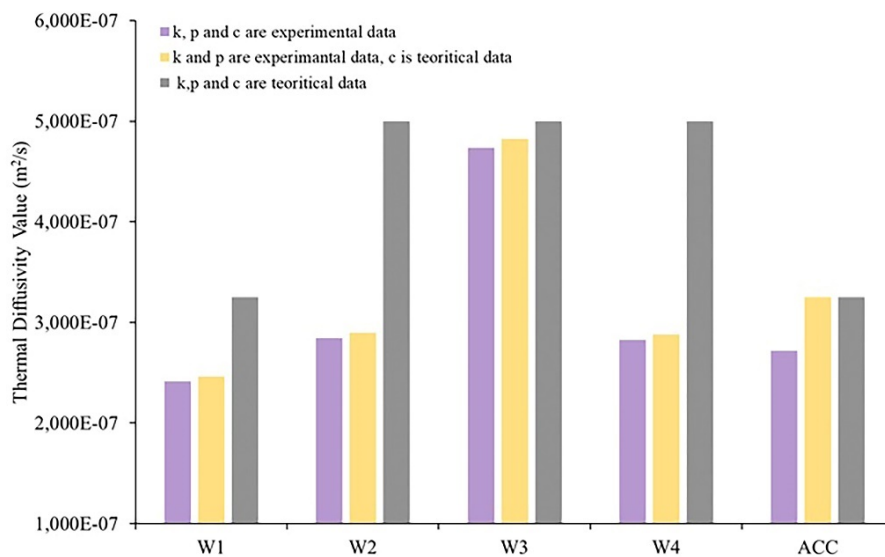


Experimentally determined  $\lambda_{EXP}$  and  $\rho_{EXP}$  for wall sections were used to determine the  $\alpha_{EXP}$  and  $e_{EXP}$  values of the wall sections. In addition, the specific heat of wall sections could not be determined experimentally. Therefore, the specific heat data obtained by weighted averages of experimentally determined specific heats of mortar and autoclaved aerated concrete forming the wall section were used to calculate  $\alpha_{EXP}$ ,  $e_{EXP}$ , and  $VCH_{EXP}$  values of the wall sections. Both theoretical data and experimental data were determined for both mortar and wall sections given in Table 5. The  $\alpha_{EXP}$  value of autoclaved aerated concrete was determined as  $2.72 \times 10^{-7}$ , and the  $\alpha_{TEO}$  value was determined as  $3.25 \times 10^{-7}$ . In the literature, the thermal diffusivity value of autoclaved aerated concrete with different densities is given as  $2.2 \times 10^{-7}$ - $2.8 \times 10^{-7}$  [2].

**Table 5.** Thermophysical properties of aerated concrete, distinct mortars, and wall sections

Code	Mass (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	Moisture Content (%)	Thermal Diffusivity Value (m <sup>2</sup> /s)		Thermal Effusivity Value (Ws <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> K)		Volumetric Heat Capacity (J/m <sup>3</sup> K)	
	m	v	$\rho_{EXP}$	w	$\alpha_{EXP} \times 10^{-7}$	$\alpha_{TEO} \times 10^{-7}$	$e_{EXP}$	$e_{TEO}$	$VCH_{EXP}$	$VCH_{TEO}$
AAC	1.507	0.0036	418.61	11.30	2.717	3.250	222.553	228.0351	426982	400000
AACM	1.515	0.0031	484.8	-	3.516	3.250	199.006	228.0351	335622	400000
CM	6.283	0.0031	2010.56	12.60	7.976	8.000	1791.579	1788.8544	2006097	2000000
LM	5.48	0.0031	1753.60	29.70	6.721	5.556	1219.765	1341.6408	1487824	1800000
CLM	6.126	0.0031	1960.32	19.73	6.239	5.556	1266.063	1341.6408	1602915	1800000
W1	1.515	0.0031	484.80	11.57	2.417	3.250	240.001	228.0351	488141	400000
W2	1.542	0.0031	493.44	11.30	2.844	5.000	268.161	282.8427	502870	400000
W3	1.42	0.0031	454.40	17.53	4.735	5.000	316.797	282.8427	460370	400000
W4	1.541	0.0031	493.12	14.23	2.826	5.000	265.251	282.8427	498992	400000

Thermal diffusivity values of autoclaved aerated concrete and wall sections calculated by experimental and theoretical data were compared. As a result of this comparison, it was seen that the  $\alpha_{EXP}$  value calculated through the experimentally obtained  $\lambda_{EXP}$ ,  $\rho_{EXP}$ , and  $c_{EXP}$  data was lower than the  $\alpha_{TEO}$  value calculated by theoretical data (Figure 5). As a result of the calculation made using theoretical data, the  $\alpha_{TEO}$  value for jointless autoclaved aerated concrete (AAC) and W1-coded wall section was determined as  $3.25 \times 10^{-7}$ ; regardless of the mortar type, the  $\alpha_{TEO}$  value was found to be a similar  $5.0 \times 10^{-7}$  for all constructed wall sections (wall sections coded W2, W3, and W4) (Figure 5 and Table 5). Since it was understood in this study that the thermal properties of mortars produced from different materials exhibit variances, it is anticipated that the thermal properties of walls built with various mortars will also be other. However, these differences could not be revealed using standard data because there is an absence of comprehensive theoretical data capable of delineating each material distinctly. Conclusively, through this study, the differences in the thermal properties of wall sections made with distinct mortars could be determined numerically by incorporating experimentally obtained thermophysical properties into the calculations.



**Figure 5.** Experimental and theoretical thermal diffusivity values of autoclaved aerated concrete wall sections

It has been evaluated that some thermal properties defining construction materials are not commonly found in the literature. The accuracy of the data obtained as a result of the experiments carried out in this study was ensured by taking gas concrete as a reference. The experimental data obtained for gas concrete are compatible with the literature data. This situation shows the accuracy of the experimental results obtained for other materials as a result of this study. However, more similar studies are needed in this field to reach a definite conclusion.

#### 4. Conclusion

In this study, wall sections were created using four distinct mortars, such as autoclaved aerated concrete adhesive mortar, cement mortar, lime mortar, and cement-lime mortar at the joints of the autoclaved aerated concrete wall-filling material. Certain basic thermophysical properties of both materials (autoclaved aerated concrete and mortars) and wall sections were determined. Through the data obtained, the thermal diffusivity, thermal effusivity, and volumetric heat capacities of the wall sections constructed with distinct mortars were identified. The experimental data resulting from the study were compared with theoretical data, and the thermal performance of the wall sections was discussed. The results obtained within the compass of this study are summarized below.

- The experimentally determined thermal properties of the wall sections were similar to the values listed in the literature. However, a significant increase was observed in the thermal conductivity of the W3-coded lime mortar and wall section compared to other wall sections. Adequate adhesion was not attainable between the aerated concretes and lime mortar, leading to air leakage at the joint. It was also observed that the moisture content of lime mortar was high. Both air leakage and moisture content caused the thermal conductivity and thermal transmittance value to be high in this wall section.
- It was observed that the mortar with a cement mortar had the highest density among the mortar plates. Again, upon further examination of the wall sections, it was observed that those constructed with high-density mortars exhibited elevated density levels.
- The specific heat values of the autoclaved aerated concrete and mortars used in the research were determined by laboratory experiments. It turned out that each material had a different specific heat value. However, it is seen that the specific heat values presented in the literature/standards for all masonry materials are similar. In future studies, the specific heat values of the materials must be determined experimentally. A data archive should be created for the correct specific heat values of materials, and this deficiency in the literature should be addressed.
- Thermal properties of materials directly affect the thermal performance of the structural element in which that material is used. Determining the real thermal performance of structures is very important in terms of increasing energy efficiency. Therefore, it is necessary to know the real thermal properties of materials.

In conclusion, it is known that the thermal performance of walls constructed with mortars possessing varied thermophysical properties will be different. However, these differences cannot be revealed with theoretical data taken from the literature/standards. The actual thermal properties of the walls can only be determined by incorporating the experimentally obtained thermophysical properties in the calculations. This study revealed that autoclaved aerated concrete wall sections built with distinct mortars possess distinct thermal properties. The literature review conducted as part of the study unveiled the need for more information on specific heat, a fundamental thermal property of building materials. Therefore, it is recommended that new research be conducted and a large data archive created to determine the basic thermal properties of existing building materials, especially specific heat values. It is essential to contribute the data concerning these thermal properties currently absent in building materials to the literature. It will facilitate access to accurate data, which is especially necessary for theoretical studies. Thus, it is thought that it will contribute to studies to determine the real energy performance of buildings and building elements.

#### Acknowledgments

This study was supported by the "Comparison of Certain Thermophysical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Walls Built with Different Mortars" project as part of the 2022/1 Term TUBITAK 2209-A University Students Research Projects Support Program. R.K.T. performed the experiments and wrote the article. O.E.Ö. performed the experiments.

## References

- [1] Andolsun S. A study on material properties of autoclaved aerated concrete (AAC) and its complementary wall elements: their compatibility in contemporary and historical wall sections. MSc, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2006.
- [2] Grinzato E, Bison P, Tavukcuoglu A. Caratterizzazione di materiali edili, con il metodo integrato termografico-ultrasonico-analitico. AIPnD-PnD Congresso; 2009 Oct 15-17; Rome, Italy.
- [3] TS 453. Gas and foam concrete material and elements for building. Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 2005.
- [4] TS EN 771-4+A1. Specification for masonry units - Part 4: Autoclaved aerated concrete masonry units. Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 2015.
- [5] Wakili GK, Hugi E, Karvonen L, Schnewlin P, Winnefeld F. Thermal behaviour of autoclaved autoclaved aerated concrete exposed to fire. *Cem Concr Compos.* 2015; 62: 52–58.
- [6] RILEM. Recommended practice- RILEM Technical Committees: 78-MCA and 51-ALC. Autoclaved Aerated Concrete- Properties, Testing, and Design. S. Aroni, GJ. de Groot, MJ. Robinson, G. Svanholm and Wittman F.H. ed. Taylor & Francis Group, London and New York, 1993.
- [7] Taşdemir C, Ertokat N. Gazbetonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir değerlendirme. Proceedings of 1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi; 2002; 2, Istanbul TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi. 425-437.
- [8] Xusheng D, Zhe X, Junjiang L, Lei W. Effects of lime content on properties of autoclaved aerated concrete made from circulating fluidized bed ash. *Dev Built Environ.* 2024;18: 100406.
- [9] Deng Y, Wu L. Effect of recycled concrete fine powder after calcination on the properties of autoclaved aerated concrete. *Case Stud Constr Mater.* 2024;20: e02961.
- [10] Pehlivanlı ZO, Uzun I, Yücel ZP, Demir I. The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Constr Build Mater.* 2016;112: 325–330.
- [11] TS 825. Thermal insulation requirements for buildings, Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 2013.
- [12] Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and properties of aerated autoclaved concrete: a review. *Cem Concr Compos.* 2000; 22: 321-329.
- [13] Johra H. Thermal Properties of Building Materials-Review and Database Technical Report No. 289. Energy & Indoor Environment; 2021; Aalborg University Department of the Built Environment Division of Sustainability.
- [14] Tuğla R, Tavukcuoğlu A, Arslan M. Examination of thermal properties and failures of brick walls by the use of infrared thermography and hot box method. International Conference & Exhibition on Application of Efficient & Renewable Energy Technologies in Low-Cost Buildings and Construction; 2013; Ankara, Türkiye, 180-199.
- [15] Kosny J. Performance analysis of autoclaved aerated concrete; an example of collaboration between industry and a research lab on development of energy efficient. *Build Industry Trends* 1994; 10: 161–172.
- [16] TS EN 1745. Masonry and masonry products - Methods for determining design thermal values. Turkish Standards Institution; 2020; Ankara, Türkiye.
- [17] Horak HL, York DA, Hunn BD, Peterson JL, Roschke MA, Tucker EF. DOE-2 Reference Manual 2. Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
- [18] Clarke JA, Yaneske PP, Pinney AA. The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials. Watford UK: Building Research Establishment, 1991.
- [19] URL1: Integrated Environmental Solutions Limited (IESVE). Specific Heat Capacity. Available: <https://tinyurl.com/eb83nadk> (accessed on: 25 September 2023)
- [20] Koçkar Tuğla R. Determination of thermal diffusivity value of building walls by quantitative infrared thermography. Ph D Thesis (Ankara: Gazi Universty) Türkiye, 2019.
- [21] Aruntaş HY, Şahinöz M, Dayı M. Investigation of lime usage in cement paste and mortars. *J Polytechnic* 2021; 24(3):1045-1054.
- [22] Michelini E, Ferretti D, Miccoli L, Parisi F. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments *Constr Build Mater.* 2023;402: 132996.
- [23] BS EN 12667. Thermal Performance of building materials and products- determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods- products of high and medium thermal resistance. British Standard, 2001.
- [24] TS 4048. Determination of Specific Heat of Thermal Insulating Materials. Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 2013.
- [25] Çiçek P. Thermal performance assessment of historical Turkish baths. MSc, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2009.
- [26] Çengel Y. Isı ve kütle transferi pratik bir yaklaşım (3<sup>rd</sup> Edition), Izmir: Güven Kitabevi, 2011.
- [27] RILEM. Tentative Recommendations, Commission–25–Pem, Recommended Test to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods. *Mater Struct.* 13(73): 173-25. 1980.
- [28] TS EN 1936. Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 2007.
- [29] URL2 Available: [https://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/f7deb880ca6b4b7\\_ek.pdf](https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f7deb880ca6b4b7_ek.pdf) (accessed on 06 December 2023)

## Gelişmiş Optik ve Elektriksel Özellikler İçin Pratik ve Rasyonel Bir Strateji: İndirgenmiş Grafen Oksit/ Polikarbazol Bazlı Hibrit Nanokompozit

Merve GÜZEL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bahçe Bitkileri Bölümü, Ziraat Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye

\*1 merveguzel@pau.edu.tr

(Geliş/Received: 13/05/2024;

Kabul/Accepted: 24/09/2024)

**Öz:** Bilim ve teknolojiadaki hızlı ilerlemeler, nanokompozitlere olan ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır. Son yıllarda özellikle karbon temelli nano yapılar ile iletken polimerin (CP) kombinasyonu ile oluşturulan nanokompozitler malzemeler oldukça dikkat çekmektedir. Her iki malzemenin avantajlarının tek bir çatı altında toplanması, nanokompozitlere çok yönlü işlevsellik kazandırmaktadır. Mevcut çalışma, CP ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) arasındaki mükemmel birlikteliğe dayalı yeni bir nanokompozit malzemesinin eldesini içermektedir. Bu kapsamda, ilk olarak, rGO ile modifiye edilen indiyum kalay oksit (İTO) elektrodun üzerinde karbazol bazlı monomerin (PFA-Cz kodlu) elektrokimyasal polimerizasyon yöntemiyle kaplanmasıyla yeni bir rGO/CP hibrit nanokompozit polimer film elde edilmiştir. Bu nanokompozit filmin optik ve elektriksel özellikleri, homopolimer ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Nanokompozit film, homopolimerin redoks özellikleri ile rGO'nun iyi elektronik iletkenliğinin birleşimine dayanan ilginç sinerjik özellikler sergilemiştir. Bu kombinasyon, gelişmiş elektriksel ve optik özelliklere sahip nanokompozit malzemeler eldesi için pratik ve rasyonel bir strateji olarak değerlendirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** İndirgenmiş grafen oksit, karbazol-bazlı monomer, nanokompozit, optik ve elektriksel özellikler.

### A Practical and Rational Strategy for Improved Optical and Electrical Properties: Reduced Graphene Oxide/Polycarbazole Based Hybrid Nanocomposite

**Abstract:** Rapid advances in science and technology increase the interest in nanocomposites day by day. In recent years, nanocomposite materials formed by the combination of carbon-based nanostructures and conductive polymer (CP) have attracted considerable attention. The combination of the advantages of both materials under one roof provides versatile functionality to nanocomposites. The present study includes the preparation of a new nanocomposite material based on the excellent association between CP and reduced graphene oxide (rGO). In this context, firstly, a new rGO/CP hybrid nanocomposite polymer film was obtained by coating carbazole-based monomer (coded PFA-Cz) on the indium tin oxide (ITO) electrode modified with rGO by electrochemical polymerization method. The optical and electrical properties of this nanocomposite film were investigated comparatively with the homopolymer. The nanocomposite film exhibited interesting synergistic properties based on the combination of the redox properties of the homopolymer with the good electronic conductivity of rGO. This combination can be considered as a practical and rational strategy for obtaining nanocomposite materials with improved electrical and optical properties.

**Key words:** Reduced graphene oxide, carbazole-based monomer, nanocomposite, optical and electrical properties.

#### 1. Giriş

İletken polimerler (CP'ler), ayarlanabilir elektronik ve optik özellikleri, mekanik esneklikleri, çözünebilirlikleri, kolay sentezleri ve düşük maliyetleri gibi benzersiz özellikleri nedeniyle enerji, kataliz, sensör ve diğer pek çok alanda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [1-3]. En çok çalışılan organik iletken malzemelerin başında polikarbazol gelmektedir [4-5]. Diğer konjuge polimerler ile karşılaştırıldığında, karbazol bazlı polimerler (PCz) yüksek elektron hareketlilikleri, uzun vadeli redoks kararlılıkları ve UV spektral bölgede güçlü absorpsiyonlarıyla gelişmiş elektro ve foto-aktif özellikler göstermektedirler [6-8]. Polikarbazol ve türevlerinin bu eşsiz karakteristikleri, onları güneş pilleri [9], sensörler [10], süper kapasitörler [11], elektrokromik cihazlar [12], ve organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) [13] gibi alanlarda kullanım potansiyeli sağlamaktadır. Bununla birlikte, PCz'nin zayıf elektriksel iletkenlik, düşük optik kontrast ve zayıf çözünürlük gibi bazı dezavantajlarını da bulunmaktadır ve bu da gelecekteki uygulamalarını oldukça kısıtlamaktadır [5]. PCz'nin bu sınırlamalarının üstesinden gelmek ve kullanım potansiyelini geliştirmek için yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

\* Sorumlu yazar: [merveguzel@pau.edu.tr](mailto:merveguzel@pau.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-0603-3933

Bilimdeki önemli ilerlemelere rağmen, araştırmacılar hala organik iletken malzemelerin kapsamını geliştirmeye ve genişletmeye çalışmaktadırlar. Bu kapsamda polimer omurgasının elektronik yapısını değiştirmek için farklı stratejiler geliştirilmiştir. Kullanılan çeşitli stratejiler arasında en etkili olanı ise, iletken polimerler ile karbon bazlı nanomalzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen nanokompozitlerdir [14-16]. Bu tür hibrit malzemelerin temelini, kombinasyon ve sinerji olarak tanımlanan iki ana kavram oluşturmaktadır. Aynı zamanda her iki malzemenin avantajlarını birleştiren bu yaklaşım, nanokompozitlere çok yönlü işlevsellik kazandırmaktadır [17-19]. Karbon temelli nanomalzemelerin en umut verici malzemeleri arasında “İndirgenmiş Grafen oksit (rGO)” yer almaktadır. rGO’lar sahip oldukları benzersiz optik, mekanik ve elektriksel özellikler nedeniyle malzeme biliminin en popülerleri arasında yer almaktadır [20-22]. Literatürde rGO ile iletken polimer arasındaki sinerjik etkinin, kompozit malzemelere benzersiz özellikler kazandırdıkları rapor edilmiştir [23-26]. Bu türden bir etki, polimer zincirlerinin konjuge yapısı ile rGO nano tabakaları arasında  $\pi$ - $\pi^*$  istiflemesine ve güçlü arayüzey etkileşimlerine yol açmaktadır. Ancak kontrol edilebilir ve istenilen özelliklere sahip nanokompozitlerine olan ilgi hala devam etmektedir. Bu açıdan bakıldığında, yüksek performanslı rGO/CP hibrit nanokompozit filmler üretmek için pratik, kolay ve akılcı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde rGO/polikarbazol ve diğer katkı maddelerinin bir araya getirilmesiyle hazırlanan hibrit malzemelere ait çalışmalar mevcuttur [27-29]. Ancak, sadece rGO/polikarbazol hibrit nanokompozit içeren çalışma yok denecek kadar azdır. Bu sebeple, mevcut çalışma gelişmiş optik ve elektriksel nanokompozit malzemeler elde etmek için pratik ve rasyonel bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada gelişmiş optik ve elektriksel özelliklere sahip yeni bir rGO/CP nanokompozit elde edilmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak, azometin bağı ile işlevselleştirilmiş N-ikame edilmiş karbazol bazlı monomer sentezlenmiştir ve başarılı bir şekilde karakterize edilmiştir. İTO cam üzerinde belirlenen optimum miktarda indirgenmiş grafen oksit immobilize edilmiştir. PFA-Cz monomerin elektrokimyasal polimerizasyonu rGO ile modifiye edilen İTO elektrot üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen rGO/pPFA-Cz nanokompozit ile homopolimerim optik ve elektrokimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Homopolimer ve nanokompozit filmlerin yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak aydınlatılmıştır. rGO ve iletken polimer arasındaki sinerjistik etkileşimler, homopolimere kıyasla nanokompozit filmin daha yüksek optik kontrast, daha hızlı tepki süresi, daha geniş yük kapasitesi ve daha uzun vadeli kararlılık gibi üstün performanslar sergilemesine yol açmıştır. Elde edilen bu nanokompozit film, akıllı camlar gibi ileri teknoloji uygulamaları için uygun bir aday olabilir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar

N-(4-Formil fenil) karbazol, anilin, asetonitril (ACN), diklorometan (DCM), dimetil formamid (DMF), dötero dimetil sülfoksit (DMSO- $d_6$ ), lityum perklorat ( $\text{LiClO}_4$ ), 2,3,4,5,6-pentafluoroanilin, moleküler sieve, glasiyel asetik asit ve metanol Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir ve kimyasallar herhangi bir işleme tabi tutulmadan temin edildiği gibi kullanılmıştır. İndirgenmiş grafen oksit (rGO) Nanografi Nano Teknoloji firmasından (Ankara, Türkiye) temin edilmiştir.

PFA-Cz monomerin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu çözücü olarak DMSO- $d_6$  kullanılarak JEOL ECZ500R marka NMR cihazında kaydedilmiştir. Kimyasal kaymalar dahili standart olarak tetrametilsilana (TMS) göre ppm cinsinden rapor edilmiştir. Monomerin erime noktası Stuart SMP10 model erime noktası cihazı ile belirlenmiştir. İTO elektrotlar üzerinde sentezlenen polimerlerin yüzey morfolojilerini incelemek için Zeiss Supra 40VP alan emisyon taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Polimer filmlerin optik özellikleri Agilent 8453 model UV-Vis spektrofotometre ile İviumstat Potansiyostat-Galvanostat cihazı eş zamanlı olarak kullanılarak analiz edilmiştir.

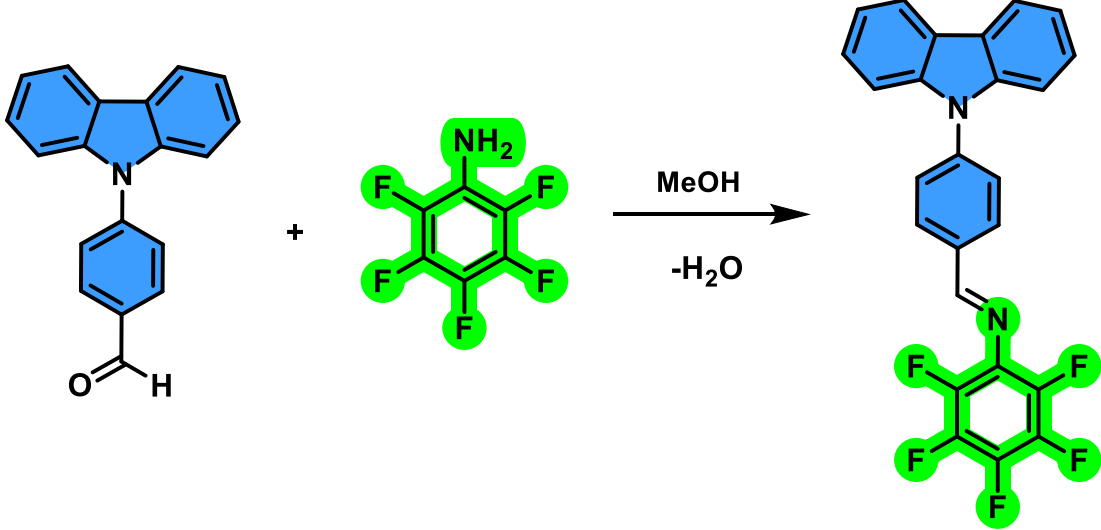
### 2.2. Monomer sentezi

(E)-1-(4-(9H-karbazol-9-il)fenil)-N-(perflorofenil)metanimin (kısaca PFA-Cz) monomeri literatüre göre sentezlenmiştir [30].

0,271 g (1 mmol) N-(4-formilfenil) karbazol 20 mL metanol içerisinde ve reaksiyon sıcaklığı  $65\text{ }^\circ\text{C}$  olarak şekilde karıştırılarak çözülmüştür. Daha sonra karışıma 3 damla glasiyel asetik asit eklenmiştir. 1 mmol (0,183 g) 2,3,4,5,6-pentafluoroanilin 5 mL metanol çözülerek reaksiyon karışımına damla damla ilave edilmiştir. Reaksiyon sırasında açığa çıkan suyu tutmak için karışıma 0,1 g moleküler elek eklenmiştir. Reaksiyon karışımı 48 saat geri soğutucu altında reflaks edilmiştir. Bu sürenin sonunda çözelti süzümüştür. Elde edilen katı ürün metil alkol içerisinde kristallendirilmiştir. Sarı renkteki ürünün verimi %72 ve erime noktası ise  $172\text{-}175\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

$^1\text{H-NMR}$  (400 MHz, 25 °C, DMSO- $d_6$ )  $\delta$ : 10,14 (s; H<sup>a</sup>, -CH), 8,27 (d; 2H<sup>c</sup>), 8,20 (d; 2H<sup>b</sup>), 7,93 (d; H<sup>e</sup>), 7,52 (d; H<sup>c</sup>), 7,47 (t; 3H<sup>f</sup>), 7,35 (t; 3H<sup>d</sup>).

PFA-Cz monomerinin sentez yolu Şema 1’de verilmiştir.



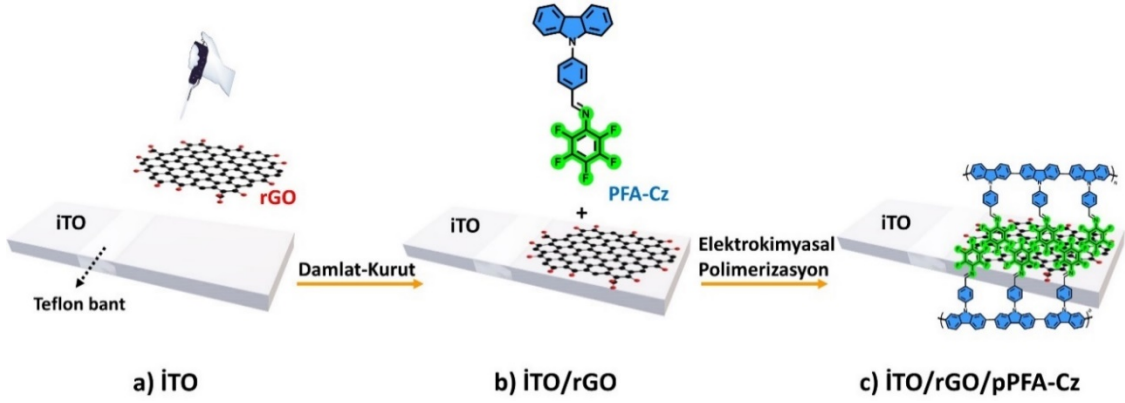
Şema 1. (E)-1-(4-(9H-karbazol-9-il) fenil)-N-(perflorofenil)metanimin (PFA-Cz)’nin sentez şeması.

### 2.3. İTO elektrotun RGO ile modifikasyonu

RGO’nun İTO yüzeyine modifikasyonu için damlat-kurut (drop-dry deposition,DDD) yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak rGO dispersiyonu literatürde belirtilen prosedüre göre hazırlanmıştır [31]. Homojen bir indirgenmiş grafen oksit süspansiyonu oluşturmak için, 0,2 mg rGO 10 ml DMF çözücüsü içinde 1 saat boyunca ultrasonik banyoda sonikasyona tabi tutulmuştur. Modifikasyon işleminden önce İTO çalışma elektrotları literatürde verilen yöntemle göre temizlenmiştir [32]. İTO elektrotların yüzeyi 1,2 cm<sup>2</sup> (0,6 cm × 2 cm) alan olacak şekilde teflon izole bant ile sarılarak hazırlanmıştır. Disperse edilmiş rGO çözeltisi farklı miktarlarda (5 µl, 10 µl, 25 µl, 50 µl ve 100 µl) İTO çalışma elektrotlarına ayrı ayrı damlatılmış ve karanlıkta oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra modifiye elektrotlar etüvde 80 °C’de 3 saat boyunca kurutulmuştur. İTO modifiye elektrodun en homojen ve şeffaf olduğu optimum rGO miktarı 25 µl olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu rGO miktarı literatürdeki çalışmalarla da uyumluluk göstermiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak 25 µl rGO miktarında hazırlanan modifiye elektrot için aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

### 2.4. İTO/rGO/pPFA-Cz elektrodun hazırlanması

Elektrokimyasal çalışmalar, sırasıyla referans elektrot (Ag tel), karşı elektrot (Pt tel) ve çalışma elektrottan (İTO, 8–12 Ω/sq, 7 × 50 × 0,7 mm) oluşan üç elektrotlu konfigürasyona sahip bir kuvars küvet içinde gerçekleştirilmiştir. PFA-Cz monomerinin elektropolimerizasyonu, 0,001 M monomer ve 0,1 M LiClO<sub>4</sub> içeren ACN çözeltisi içerisinde dönüşümlü voltametri (CV) tekniği kullanılarak rGO ile modifiye edilen İTO elektrot üzerinde gerçekleştirilmiştir. CV ölçümü için optimum şartların 0,3-1,5 V potansiyel pencere, 6 döngü ve 100 mV s<sup>-1</sup> tarama hızı olduğu belirlenmiştir. rGO/pPFA-Cz’nin İTO elektrot üzerindeki hazırlanışının şematik olarak gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur. Elde edilen rGO/pPFA-Cz elektrodunun optoelektronik davranışları 0,1 M LiClO<sub>4</sub>/ACN çözelti ortamında homopolimer ile karşılaştırarak incelenmiştir.



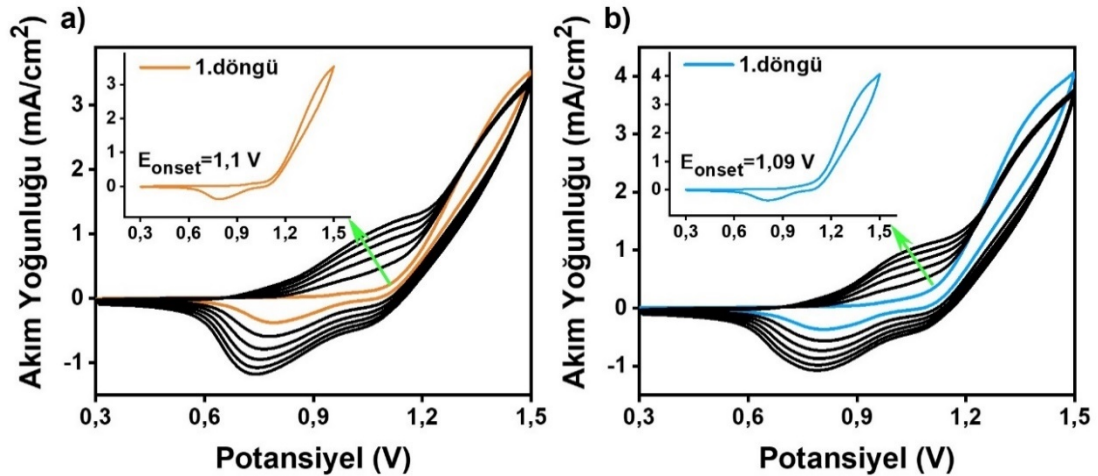
Şekil 1. a) İTO, b) İTO/rGO ve c) İTO/rGO/pPFA-Cz elektrotlarının hazırlanışı

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Elektrokimyasal sentez

Dönüşümlü voltametri (CV), monomerlerin ve onlardan elde edilen polimerlerin redoks davranışlarını incelemek için kullanılan en önemli tekniklerin başında gelmektedir [33].

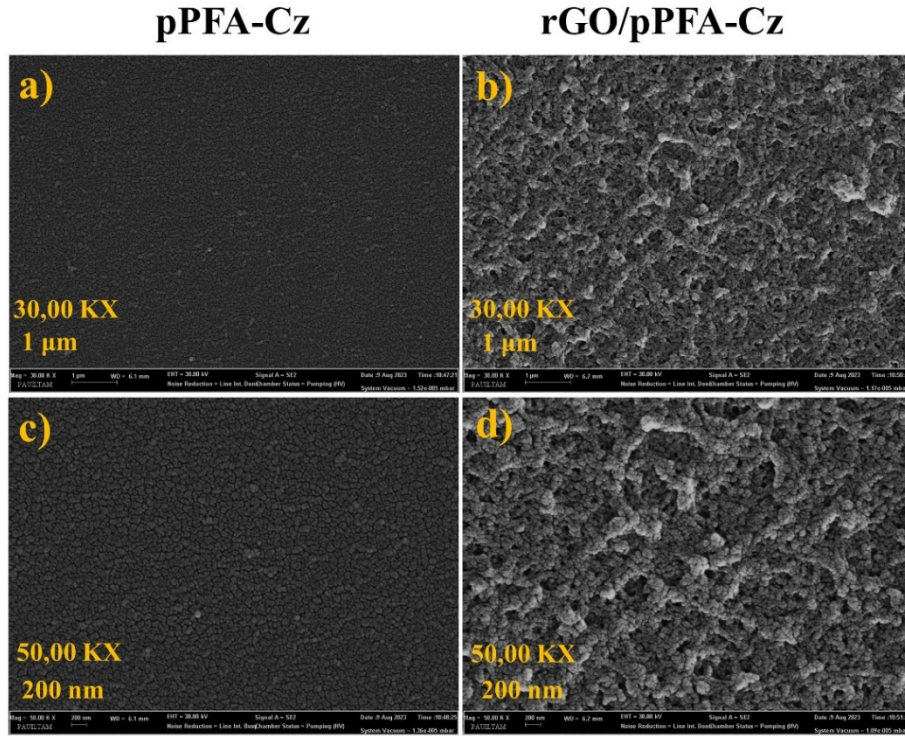
PFA-Cz kodlu monomerin elektrokimyasal polimerizasyonu, 0,1 M LiClO<sub>4</sub>/ACN sistemi içinde ve CV tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 0,3 V ile 1,5 V potansiyel pencerede, 100 mV/s tarama hızıyla 6 döngü alınarak hem İTO hem de rGO ile modifiye edilen İTO elektrot üzerinde oluşturulan polimerlerin CV grafikleri Şekil 2’de gösterilmiştir. İlk anodik döngüden, monomerin başlangıç oksidasyon potansiyeli ( $E_{onset}$ ) sırasıyla 1,1 V ve 1,09 V olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşıldığı üzere, rGO ile modifiye edilen elektrodun başlangıç oksidasyon potansiyel değerinin, modifiyesiz olana göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. rGO ve PFA-Cz arasındaki güçlü sinerjik etki,  $\pi$ - $\pi^*$  etkileşimini artırarak elektron transferinin kolaylaşmasına neden olmuştur [34]. Bu durum elektropolimerizasyonun daha etkili hale gelmesine sağlamıştır. Her iki CV diyagramında, döngü sayısının artmasıyla birlikte akım yoğunluklarında bir artış meydana gelmiştir. Maksimum anodik akım yoğunluğu cevapları sırasıyla polimer film için 3,33 mA cm<sup>-2</sup> ve nanokompozit için 4,04 mA cm<sup>-2</sup>’dir. Polimer filme kıyasla, nanokompozit filmde akım yoğunluğunda gözlenen artışın daha fazla olması (%21,32), İTO elektrot yüzeyinde daha fazla polimer biriktiğini göstermektedir.



Şekil 2. PFA-Cz monomerinin a) İTO ve b) İTO/rGO modifiye elektrotları üzerindeki dönüşümlü voltametri grafikleri. Tarama hızı: 100 mV s<sup>-1</sup>. (İç grafik: PFA-Cz ve rGO/PFA-Cz için ilk döngü grafikleri)

### 3.2. Morfolojik karakterizasyon

Hazırlanan polimer ve nanokompozit filmlerin yüzey morfolojileri SEM ile karakterize edilmiştir. İTO elektrotlar üzerinde hazırlanan pPFA-Cz ve rGO/pPFA-Cz filmlerinin 30,00 ve 50,00 kat büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 3'te sunulmuştur. Her iki büyütmede de polimer ve kompozit filmlerin birbirinden farklı yüzey morfolojileri sergilediği görülmüştür. pPFA-Cz polimer filmi, granül kümelerin homojen olarak dağıldığı bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 3a-c, sol sütun). Polimere kıyasla, nanokompozit filmin oldukça farklı olan yüzey görüntüsü, polimer içerisinde istiflenmiş rGO'ların varlığına işaret etmektedir rGO ile modifiye edilen kompozit filmin, ağ benzeri topografya ile gözenekli bir morfolojiye sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 3b-d, sağ sütun). Bu morfoloji, doping/dedoping durumlarında iyon giriş/çıkışının daha kolay olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda rGO ve pPFA-Cz arasındaki sinerjistik arayüzey etkileşimler, elektron transferini kolaylaştırarak kompozit filmin daha yüksek yük kapasitesi ve daha hızlı tepki süresine sahip olmasına katkı sağlamıştır. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, her iki filmde İTO elektrot üzerinde başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

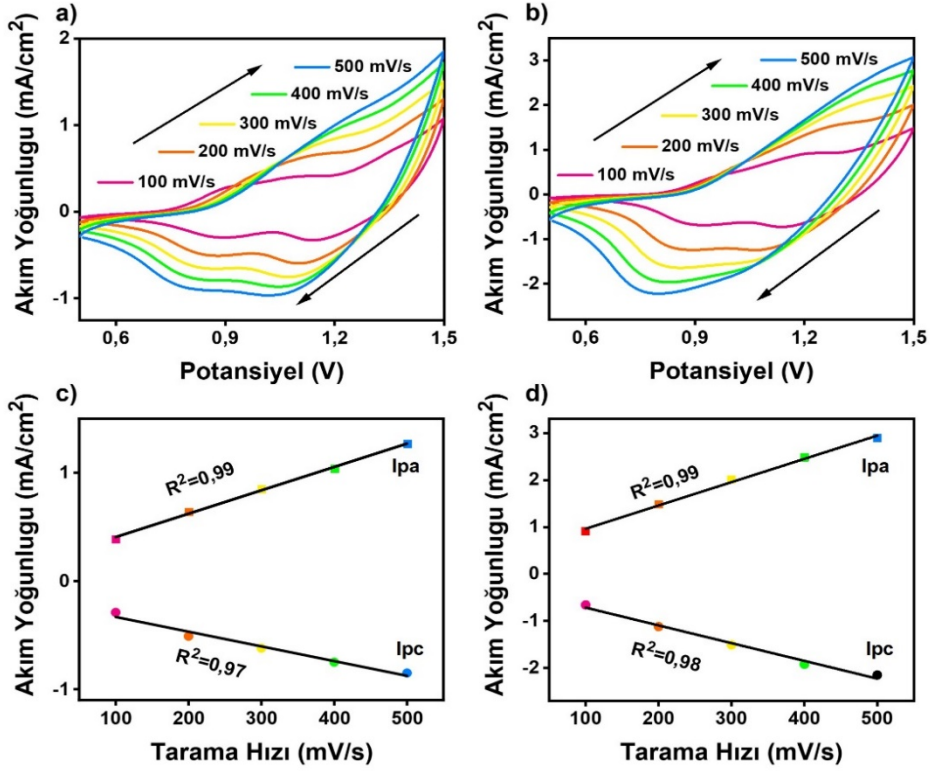


Şekil 3. pPFA-Cz a) 30,00 KX ve c) 50,00 KX ile rGO/pPFA-Cz'nin b) 30,00 KX ve d) 50,00 KX SEM görüntüleri.

### 3.3. pPFA-Cz ve rGO/pPFA-Cz'nin elektrokimyasal karakterizasyonu

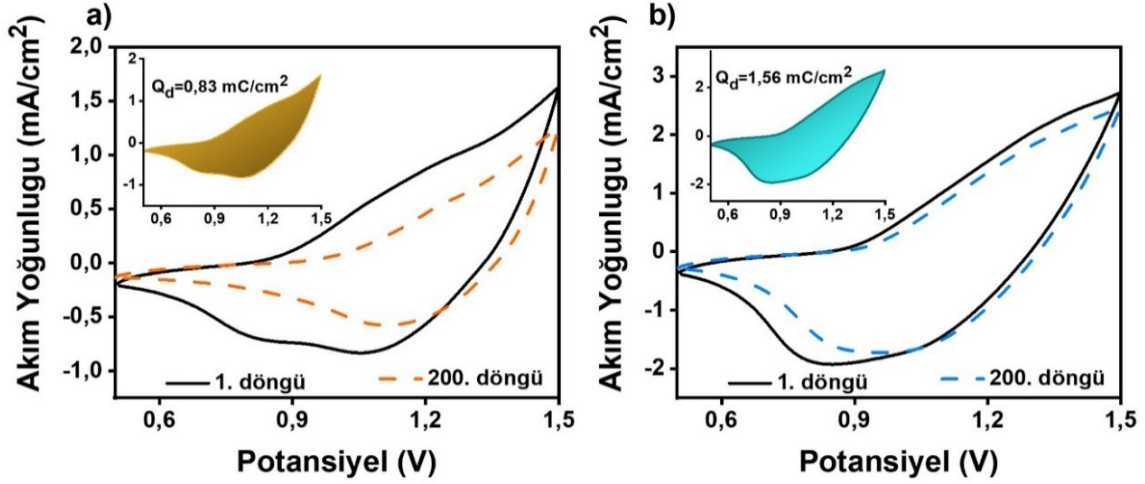
Farklı tarama hızlarının polimer filmlerin redoks davranışları üzerindeki etkisini incelemek için dönüşümlü voltametri çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda 0,1 M LiClO<sub>4</sub>/ACN elektrolit çözeltisinde 100'den 500 mV/s 'ye kadar değişen tarama hızlarında ve 0,5-1,5 V potansiyel çalışma aralığında polimer filmlerin dönüşümlü voltamogramları kaydedilmiştir (Şekil 4a ve 4b). CV grafikleri incelendiğinde, tarama hızı arttıkça akım yoğunlukları da artmıştır. Bununla birlikte nanokompozitin akım yoğunluğundaki artışın (%65), homopolimere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Aynı zamanda, anodik ve katodik pik akımı (I<sub>pa</sub> ve I<sub>pc</sub>) değerleri tarama hızına karşı grafiğe geçirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4c ve 4d'de sunulmuştur. Bu grafiklerden elde edilen I<sub>pa</sub>/I<sub>pc</sub> korelasyon katsayısı değerleri (R<sup>2</sup>) sırasıyla pPFA-Cz için 0,99/0,97 ve rGO/pPFA-Cz için ise 0,99/0,98 olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden de anlaşılacağı üzere, pik akımı ile tarama hızı arasında iyi bir doğrusal ilişki bulunmaktadır. Bu durum her iki filmin de elektroaktif olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak redoks işleminin difüzyon kontrollü olmadığı ve her iki polimer filmin de İTO elektrot yüzeyine iyi yapıştığı tespit edilmiştir.





Şekil 4. a) pPFA-Cz ve b) rGO/pPFA-Cz'nin farklı tarama hızlarında alınan CV grafikleri. c) pPFA-Cz ve d) rGO/pPFA-Cz'nin pik akım yoğunlukları ile tarama hızları arasındaki doğrusal ilişki grafikleri

Polimer filmlerin redoks stabilitesi, elektrokromik cihazların performansını değerlendirmek için gerekli olan parametrelerin başında gelmektedir. İTO elektrotlar üzerinde elde edilen polimer ve kompozit filmlerin uzun-vadeli kararlılıklarını analiz etmek için CV tekniği kullanılmıştır. Bu amaçla 0,5 V ile 1,5 V potansiyeller arasında ve 400 mV/s tarama hızında sürekli döngü ölçümleri alınmıştır. Polimer filmlerin monomer içermeyen elektrolit çözeltisinde 300 döngü boyunca ayrı ayrı kaydedilen CV grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Polimer film, 200 döngüden sonra elektroaktivitesinin yaklaşık %58'ini koruyabilirken, nanokompozit film %89'unu koruyabilmiştir. Sürekli çevrim boyunca kompozit film mükemmel bir elektrokimyasal kararlılık göstermiştir. Bunun yanında CV grafiklerinin altında kalan alanının (1. Döngü) integrali alınarak polimer ve kompozit filmlerin yük yoğunlukları ( $Q_d$ ) ölçülmüştür. pPFA-Cz polimer film için  $Q_d=0,83 \text{ mC cm}^{-2}$  ve rGO/pPFA-Cz için ise  $Q_d=1,56 \text{ mC cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Nanokompozit elektrotun kapasitesi, homopolimer elektrotununkinden yaklaşık iki kat daha fazladır; ki bu durum rGO'nun elektrot kapasitesini arttırdığına işaret etmektedir. Elde edilen bilgiler ışığında rGO ile pPFA-Cz arasındaki güçlü elektrostatik etkileşimin, nanokompozit filmin daha uzun vadeli kararlılık ve de daha yüksek kapasitans göstermesine yol açtığını söylenebilir.

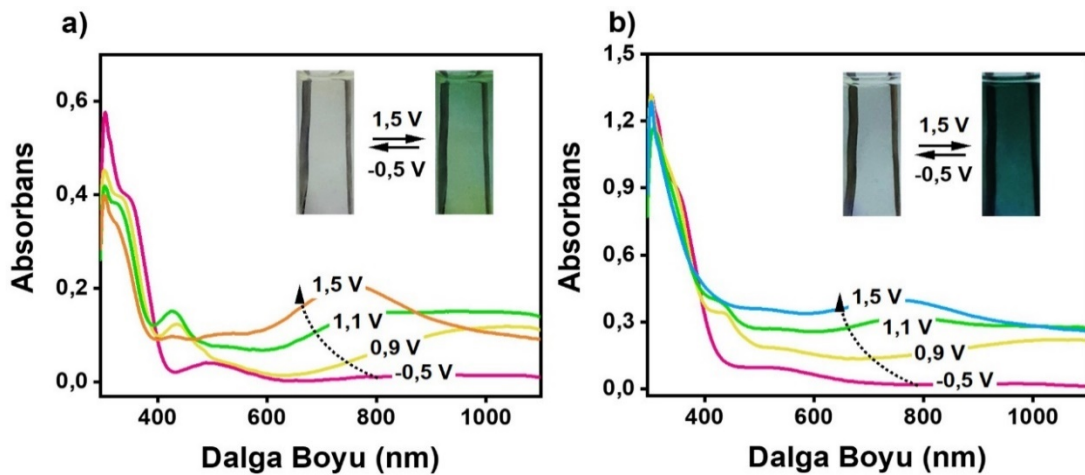


Şekil 5. a) pPFA-Cz ve b) rGO/pPFA-Cz'nin 200. döngü boyunca kaydedilen elektrokimyasal kararlılık grafikleri (İç grafik: pPFA-Cz ve rGO/pPFA-Cz için yük yoğunluğu grafikleri)

### 3.4. Spektroelektrokimyasal Özellikler

Spektroelektrokimya, doping işlemi sırasında iletken polimerlerin elektronik yapısında ve optik özelliklerinde meydana gelen değişimlerini inceleyen önemli bir analitik tekniktir.

İTO elektrotlar üzerinde ayrı ayrı hazırlanan polimer ve kompozit filmlerinin 0,1 M LiClO<sub>4</sub>/ACN destek elektrolit-çözücü sistemi içinde farklı potansiyeller altında kaydedilen UV-Vis spektrumları Şekil 6'da sunulmuştur. pPFA-Cz polimer filmi, nötr formda (-0,5 V),  $\pi$ - $\pi^*$  geçişine atfedilen maksimum absorpsiyon piki ( $\lambda_{max}$ ) 303 nm'de ortaya çıkmıştır (Şekil 6a).  $E_g = 1241/\lambda_{baş}$  denklemi (1) kullanılarak, bu geçişe ait band boşluğu enerjisi ( $E_g$ ) 3,09 eV olarak hesaplanmıştır. Potansiyel değerlerinin kademeli olarak artırılması ile bu geçişin yoğunluğu azalmış ve spektrumda 425 nm'de polaron ve 760 nm'de bipolaron olarak adlandırılan yeni yük taşıyıcıları ortaya çıkmıştır. Şekil 6b'de verilen rGO/pPFA-Cz'nin kompozit filminin absorpsiyon spektrumu incelendiğinde, -0,5 V'ta  $\pi$ - $\pi^*$  geçişinden kaynaklanan maksimum absorpsiyon pikinin 300 nm ve  $E_g$  değerinin ise 2,92 eV olduğu ölçülmüştür. Kompozit filme daha yüksek potansiyeller uygulandığında, sırasıyla 440 nm'de polaron ve 760 nm'de bipolaron bandlar oluşmuştur.



Şekil 6. a) pPFA-Cz ve b) rGO/pPFA-Cz'nin -0,5 V'tan 1,5 V'a kadar değişen potansiyeller altında kaydedilen UV-Vis absorpsiyon spektrumları

pPFA-Cz polimer ve rGO/pPFA-Cz kompozit filmlerin farklı redoks durumlarındaki renkleri Şekil 6’da iç resim olarak verilmiştir. pPFA-Cz polimer filmi nötr durumda yükseltgenmiş durumda şeffaf/açık yeşil renkteyken, rGO/pPFA-Cz kompozit film ise şeffaf/koyu yeşil renk özellik göstermiştir.

Ayrıca, polimer ve kompozit filmlerin en yüksek enerjili dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük enerjili boş moleküler orbital (LUMO) enerji seviyeleri aşağıda yer alan “Denklem (2)” ve “Denklem (3)” kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{HOMO}} = -e(E_{\text{onset}} + 4,4) \quad (2)$$

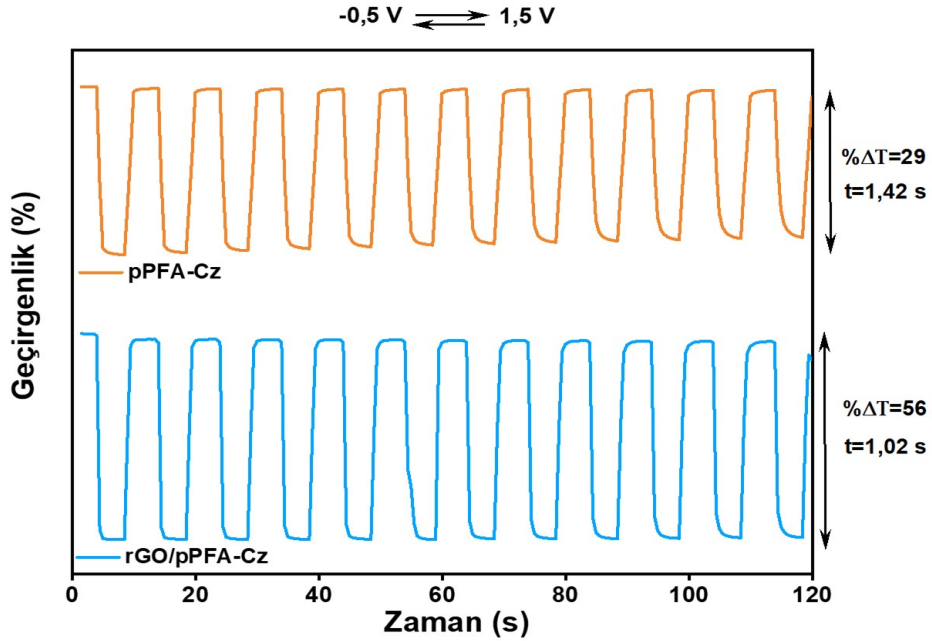
$$E_{\text{LUMO}} = E_{\text{HOMO}} + E_g \quad (3)$$

HOMO/LUMO değerleri sırasıyla pPFA-Cz için  $-5,27$  eV/ $-2,18$  eV ve rGO/pPFA-Cz için ise  $5,28$  eV/ $-2,36$  eV olarak ölçülmüştür.

### 3.5. Kinetik Çalışma

Elektrokromik malzemelerin veya cihazların performansını değerlendirmek için kullanılan diğer önemli parametreler ise optik kontrast ( $\% \Delta T$ ) ve tepki süresi ( $t$ )’dir. Kinetik çalışmalar bu özellikleri belirlemenin en kolay ve etkili yoludur. İletken polimer filmin bu yeteneklerini belirlemek için, optik spektroskopisi ile birleştirilmiş bir kare dalga voltametri yöntemi kullanılmaktadır.

İTO çalışma elektrot üzerinde ayrı ayrı elde edilen polimer ve nanokompozit filmlere  $0,1$  M  $\text{LiClO}_4/\text{ACN}$  destek elektrolit-çözücü sistemi içinde,  $760$  nm dalga boyunda (iki redoks durumları arasında maksimum absorpsiyon farkının gözlemlendiği dalga boyu)  $5$ ’er saniye aralıklarla  $-0,5$  V ve  $1,5$  V potansiyeller uygulanmıştır. Şekil 7’de verilen optik geçirgenlik-zaman grafiklerinden, optik kontrast değerleri sırasıyla pPFA-Cz için  $\%29$  ve rGO/pPFA-Cz için ise  $\%56$  olarak hesaplanmıştır. Benzer koşullarda, iki potansiyel arasında polimer filmin renk değişimi için gereken süre olarak tanımlanan tepki süresi ise sırasıyla pPFA-Cz ve rGO/pPFA-Cz için  $1,42$  s ve  $1,02$  s olarak ölçülmüştür. Kompozit filmin, polimer filme kıyasla daha yüksek optik kontrast ve daha hızlı tepki süresine sahip olduğu bulunmuştur. Aynı zamanda kompozitin gözenekli morfolojisi, redoks işlemi sırasında iyonların polimer filme taşınmasını kolaylaştırarak tepki süresinin hızlı olmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca,  $120$  saniye boyunca rGO/pPFA-Cz hibrit film kararlılığını korurken, pPFA-Cz’nin kararlılığında azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler ışığında, rGO/pPFA-Cz’nin daha yüksek elektrokromik kararlılığa sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 7. a) pPFA-Cz ve b) rGO/pPFA-Cz için optik geçirgenliğin zamana karşı değişim grafikleri

Elektrokromik malzemelerin temel parametrelerinden biri olan renklendirme verimliliği (CE), enerji tedarik süreçleriyle ilişkilidir. Polimer filmlerin CE'si aşağıdaki “Denklem (4)” ve “Denklem (5)” kullanılarak hesaplanabilir:

$$\Delta OD = \log (T_b/T_c) \quad (4)$$

$$CE (\lambda) = \Delta OD/Q \quad (5)$$

pPFA-Cz (188  $\text{cm}^2 \text{C}^{-1}$ ) ile karşılaştırıldığında, rGO/pPFA-Cz filmi 760 nm'de daha yüksek bir renklendirme verimliliğine (247  $\text{cm}^2 \text{C}^{-1}$ ) sahip olduğu hesaplanmıştır. Her iki polimer film için ölçülen tüm optoelektronik parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** pPFA-Cz ve rGO/pPFA-Cz'nin elektrokimyasal ve optik özelliklerinin özeti.

Polimer	$E_{\text{onset(pol)}}$ (V)	$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	$E_{\text{HOMO}}$ (eV)	$E_{\text{LUMO}}$ (eV)	$E_g$ (eV)	$\Delta T$ %	t (s)	$\Delta OD$	CE ( $\text{cm}^2 \text{C}^{-1}$ )
pPFA-Cz	0,87	303	-5,27	-2,18	3,09	29	1,42	0,16	188
rGO/pPFA-Cz	0,88	300	-5,28	-2,36	2,92	56	1,02	0,39	247

Literatürde rGO/CP hibrit nanokompozit malzemelerine ait elektrokimyasal ve optik özelliklerini içeren çalışmalar Tablo 2'de verilmiştir. Diğer nanokompozitlerle karşılaştırıldığında, rGO/pPFA-Cz iyi bir optik kontrasta, hızlı geçiş süresine ve yüksek bir renklendirme verimliliğine sahip olduğu söylenebilir.

**Tablo 2.** Literatürdeki rGO/CP hibrit nanokompozitlerin optoelektronik özellikleri ile ilgili parametrelerin karşılaştırılması.

Polimer	$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	CV karalılık %	$E_g$ (eV)	$\Delta T$ %	t (s)	$\Delta OD$	CE ( $\text{cm}^2 \text{C}^{-1}$ )	Ref.
PEDOT-RGO	632,8	95,36 (200 döngü)	1,40	27	3,00	0,57	66,04	[15]
PSN/rGO-ITO	458 909	99 (1000 döngü)	1,91	33 54	-	-	-	[31]
rGO/pPMA	386	99 (1000 döngü)	1,86	42	1,50	-	-	[34]
rGO/pPFA-Cz	300	89 (200 döngü)	1,02	56	1,02	0,30	247	[Bu çalışma]

#### 4. Sonuç

Bu çalışma, rGO ve iletken polimerin pratik ve akılcı bir kombinasyonu ile oluşturulan yeni bir nanokompozit malzeme eldesi ve optik ve elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesini içermektedir. İlk olarak PFA-Cz monomer sentezlenmiştir ve karakterizasyonu başarılı bir şekilde yapılmıştır. İTO elektrodun modifikasyonu ile olarak rGO damlat-kurut tekniği uygulanarak gerçekleştirilmiştir. rGO ile modifiye edilen İTO elektrot üzerinde PFA-Cz monomerin elektrokimyasal polimerizasyonu gerçekleştirilmiştir. rGO'nun konjuge polimer zincirlerine katılması, nanokompozitin morfolojisini önemli ölçüde değiştirmiştir. Nanokompozitin gözenekli morfolojisi tepki süresinin daha hızlı olmasına yol açmıştır. pPFA-Cz polimer film ile karşılaştırıldığında, rGO/pPFA-Cz nanokompozit film, 200 döngüden sonra bile elektroaktivitesinin %89'nu tutarak uzun vadeli döngü kararlılığı göstermiştir. Ayrıca rGO/pPFA-Cz nanokompozit filmin, pPFA-Cz filminden yaklaşık 2 kat daha yüksek optik kontrast ve kapasitansa sahip olduğu bulunmuştur. rGO ile polimer arasındaki sinerjistik etkileşimler,

nanokompozitin gelişmiş optik ve elektriksel özellikler göstermesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu kombinasyonun istenilen özelliklere sahip malzemeler üretmek için ideal bir strateji olduğuna işaret etmektedir.

## Teşekkür

Yazar, bu çalışma için Pamukkale Üniversitesi Kimya Bölümü İleri Polimerik Araştırmalar Laboratuvarı'nda (İPAL) gerekli araştırma olanaklarını sağlayan Prof. Dr. Metin AK'a teşekkür eder.

## Kaynaklar

- [1] Sert S, Ayranci R, Çılgı GK, Ak M. Enhancing solar thermal storage properties of azobenzenes with conductive polymer: Electropolymerization of carbazole containing photoactive cyanoazobenzene derivative. *J Energy Storage* 2023; 72, 108551.
- [2] Zhou Q, Shi, G. Conducting Polymer-Based Catalysts. *J Am Chem Soc* 2016, 138, 2868–2876.
- [3] Ayranci, R, Soganci T, Guzel M, Demirkol DO, Ak M, Timur S. Comparative investigation of spectroelectrochemical and biosensor application of two isomeric thienylpyrrole derivatives. *RSC Adv* 2015; 5, 52543–52549.
- [4] Ak, M, Soganci, T. Chapter 10. Electrochemical Properties and Electrochromic Device Applications of Polycarbazole Derivatives. in: *Electrochromic Smart Materials: Fabrication and Applications*. 2019; 293–322.
- [5] Bekkar, F, Bettahar F, Moreno I, Meghabar R, Hamadouche M, Hernáez E, Vilas-Vilela JL, Ruiz-Rubio L. Polycarbazole and Its Derivatives: Synthesis and Applications. A Review of the Last 10 Years. *Polymers (Basel)*. 2020; 12, 2227.
- [6] Guzel M, Ha SR, Choi H, Ak, M. Rational design of an “all-in-one” monomer to obtain black-to-highly transmissive electrochromic polymer. *Electrochim Acta* 2022; 404, 139761.
- [7] Soganci T, Baygu Y, Kabay N, Gök Y, Ak M. Comparative Investigation of Peripheral and Nonperipheral Zinc Phthalocyanine-Based Polycarbazoles in Terms of Optical, Electrical, and Sensing Properties. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018; 10, 21654–21665.
- [8] Coban F, Ayranci R, Ak M. Click functionalized naphthalene contained polycarbazole microspheres for use in electrochromic applications. *Opt Mater (Amst)* 2023; 143, 114205.
- [9] Cowan SR, Schulz, P, Giordano, AJ, Garcia, A, MacLeod, BA, Marder, SR, Kahn, A., Ginley DS vd. Chemically Controlled Reversible and Irreversible Extraction Barriers Via Stable Interface Modification of Zinc Oxide Electron Collection Layer in Polycarbazole-based Organic Solar Cells. *Adv Funct Mater* 2014; 24, 4671–4680.
- [10] Joshi N, Saxena V, Singh A, Koiry SP, Debnath AK, Chehimi MM, Aswal DK, Gupta SK. Flexible H<sub>2</sub>S sensor based on gold modified polycarbazole films. *Sens Actuators, B* 2014; 200, 227–234.
- [11] Almtiri M, Dowell TJ, Giri H, Wipf DO, Scott CN. Electrochemically Stable Carbazole-Derived Polyaniline for Pseudocapacitors. *ACS Appl Polym Mater* 2022; 4, 3088–3097.
- [12] Guzel M, Soganci T, Ayranci R, Ak M. Smart windows application of carbazole and triazine based star shaped architecture. *Phys Chem Chem Phys* 2016; 18, 21659–21667.
- [13] Zong W, Qiu W, Yuan P, Wang F, Liu Y, Xu S, Su SJ, Cao S. Thermally activated delayed fluorescence polymers for high-efficiency solution-processed non-doped OLEDs: Convenient synthesis by binding TADF units and host units to the pre-synthesized polycarbazole-based backbone via click reaction. *Polymer (Guildf)* 2022; 240, 124468.
- [14] Ayranci R, Baskaya G, Guzel M, Bozkurt S, Ak M, Savk A, Sen F. Carbon Based Nanomaterials for High Performance Optoelectrochemical Systems. *ChemistrySelect* 2017; 2, 1548–1555.
- [15] Ayranci R, Baskaya G, Güzel M, Bozkurt S, Sen F, Ak M. Enhanced optical and electrical properties of PEDOT via nanostructured carbon materials: A comparative investigation. *Nano-Struct Nano-Objects* 2017; 11, 13–19.
- [16] Zhang W, Dehghani-Sanij AA, Blackburn RS. Carbon based conductive polymer composites. *J Mater Sci* 2007; 42, 3408–3418.
- [17] Dhandapani E, Thangarasu S, Ramesh S, Ramesh K, Vasudevan R, Duraisamy N. Recent development and prospective of carbonaceous material, conducting polymer and their composite electrode materials for supercapacitor — A review. *J Energy Storage* 2022; 52, 104937.
- [18] Moysiewicz A, Minta D, Gryglewicz G. Conductive Polymer/Graphene-based Composites for Next Generation Energy Storage and Sensing Applications. *ChemElectroChem* 2023; 10, e202201145.
- [19] Lei W, Si W, Xu Y, Gu Z, Hao Q. Conducting polymer composites with graphene for use in chemical sensors and biosensors. *Microchim Acta* 2014; 181, 707–722.
- [20] Zhao H, Peng Z, Wang W, Chen X, Fang J, Xu J. Reduced graphene oxide with ultrahigh conductivity as carbon coating layer for high performance sulfur@reduced graphene oxide cathode. *J Power Sources* 2014; 245, 529–536.
- [21] Li W, Sim HJ, Lu H, Cao H, Chen Y, Xiao P. Effect of reduced graphene oxide on the mechanical properties of rGO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *Ceram Int* 2022; 48, 24021–24031.
- [22] Naghani EM, Neghabi M, Zadsar M, Ahangar AH. Synthesis and characterization of linear/nonlinear optical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide-based zinc oxide nanocomposite. *Sci Rep* 2023; 13, 1496.
- [23] Kumar NA, Choi HJ, Shin YR, Chang DW, Dai L, Baek JB. Polyaniline-Grafted Reduced Graphene Oxide for Efficient Electrochemical Supercapacitors. *ACS Nano* 2012; 6, 1715–1723.

- [24] Li S, Chen Y, He X, Mao X, Zhou Y, Xu J, Yang Y. Modifying Reduced Graphene Oxide by Conducting Polymer Through a Hydrothermal Polymerization Method and its Application as Energy Storage Electrodes. *Nanoscale Res Lett* 2019; 14, 226.
- [25] Abdillah OB, Rus YB, Ulfa M, Dedi IF. Recent progress on reduced graphene oxide and polypyrrole composites for high performance supercapacitors: A review. *J Energy Storage* 2023; 74, 109300.
- [26] Kumar A, Pandey N, Punetha D, Saha R, Chakrabarti, S. Enhancement in the Structural and Optical Properties after Incorporation of Reduced Graphene Oxide (rGO) Nanocomposite in Pristine CsSnBr<sub>3</sub> for Solar Cell Application. *ACS Appl Electron Mater* 2023; 5, 3144–3153.
- [27] Ates M, Caliskan S, Özten E. Supercapacitor study of reduced graphene oxide/Zn nanoparticle/polycarbazole electrode active materials and equivalent circuit models. *J Solid State Electrochem.* 2018; 22, 3261–3271.
- [28] Lei W, Wu Q, Si W, Gu Z, Zhang Y, Deng J, Hao Q. Electrochemical determination of imidacloprid using poly(carbazole)/chemically reduced graphene oxide modified glassy carbon electrode. *Sens Actuators, B* 2013; 183, 102–109.
- [29] Srivastava A, Chakrabarti P. Modulation of electronic conductivity and bandgap of electrochemically polymerised polycarbazole films using montmorillonite, multi-walled carbon nanotube and reduced graphene oxide as nanofillers. *Micro Nano Lett* 2018; 13, 1335–1338.
- [30] Guzel M, Celik E, Kart SO, Tasli PT, Karatas E, Ak M. Experimental and theoretical investigation of the substitution effects on N-substituted carbazole derivatives functionalized with azomethine bonds. *React Funct Polym* 2022; 172, 105180.
- [31] Ayrancı R. Grafen Temelli İletken Polimer-Nanokompozit Elektrodunun Sentezi, Elektrokimyasal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg* 2018; 11, 415–424.
- [32] Clark MD, Leever BJ. Analysis of ITO cleaning protocol on surface properties and polymer: Fullerene bulk heterojunction solar cell performance. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2013; 116, 270–274.
- [33] Kabay N, Güzel M, Ayrancı R, Baygu Y, Ak M, Gök Y. Synthesis, electropolymerization, and optoelectronic properties of carbazole containing imidazolium based ionic liquid. *Synth Met* 2024; 301, 117529.
- [34] Soğancı T. Nanokarbon ile Desteklenmiş Piren Sübstitüye İletken Polimerin Elektrokimyasal Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol Derg* 2019; 7, 922–934.



## COVID Geliştirme Duyarlılığını Tahmin Etmek için Makine Öğrenimi Modellerinin Geliştirilmesi

Zeynep Ertem\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Industrial and Systems Engineering, Watson School of Engineering, State University of New York Binghamton, Binghamton, USA

\*<sup>1</sup> zeynep@binghamton.edu

(Geliş/Received: 19/08/2024;

Kabul/Accepted: 18/09/2024)

**Öz:** COVID-19 genomiklerinin karmaşıklıklarını çözmek son derece önemli bir sorundur. Virüsün genetik yapısında meydana gelen mutasyonlar, ilerlemesini ve semptomatolojisini doğal olarak öngörülemez kılmaktadır. Özellikle, "Uzun COVID" terimi, COVID-19'un kalıcı sonuçlarını belirtmek için ortaya çıkmış olup, etiolojisini anlamak için yoğun çabaları tetiklemiştir. Devam eden çalışmalar, Uzun COVID'ı ve belirleyicilerini titizlikle araştırmaktadır. Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (MO) bu amaçla vazgeçilmez varlıklar olarak ortaya çıkmış olup, COVID-19 krizi ortamında hastalık duyarlılığını açıklığa kavuşturma ve öngörme konusunda dikkate değer etkinlik sergilemektedirler. Bu çerçevede, çabamız, Uzun COVID'in başlangıç olasılığını öngörmek için MO metodolojilerini kullanmaya yöneliktir. Bu amaçla, birden fazla MO modeli titizlikle eğitilmiştir. Ampirik bulgular, en yetkin modelin Uzun COVID'in meydana gelme olasılığını tahmin etmede takdir edilecek bir doğruluk oranı olan %80'e ulaştığını ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Sınıflandırma, özellik mühendisliği, özellik seçimi, makine öğrenimi.

### Development of Machine Learning Models to Predict the Susceptibility of Developing COVID

**Abstract:** Unraveling the intricacies of COVID-19 genomics is a very important problem. The mutations occurring within the virus's genetic makeup render its progression and symptomatology inherently unpredictable. Notably, the term "Long COVID" has surfaced to delineate the enduring repercussions of COVID-19, prompting concerted efforts to comprehend its etiology. Ongoing studies are meticulously investigating Long COVID and its determinants. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) have emerged as indispensable assets in this pursuit, demonstrating remarkable efficacy in elucidating underlying factors and forecasting disease susceptibility amidst the COVID-19 crisis. Within this framework, our endeavor aims to harness ML methodologies to prognosticate the likelihood of Long COVID onset. Multiple ML models have been meticulously trained for this purpose. The empirical findings reveal that the most proficient model attains a commendable accuracy rate of 80% in predicting Long COVID occurrence.

**Key words:** Classification, feature engineering, feature selection, machine learning.

#### 1. Giriş

Son zamanlarda, makine öğrenimi uygulamalarının yaygınlaşması ve hasta verilerinin artan erişilebilirliği ile, sağlık alanında makine öğrenimi tekniklerinin önemi profesyoneller arasında sürekli olarak artmakta ve bu alanın geleceği üzerinde önemli bir etki yapmaktadır. Önceden belirlenmiş algoritmalar, matematiksel fonksiyonlar ve istatistiksel analizlere dayanarak, makine öğrenimi hasta verilerini kullanarak sonuçlar, sonuçlar ve öneriler üretir. Sağlık alanı, farklı bireyler arasında geniş bir hastalık ve semptom yelpazesi nedeniyle kazalara ve hatalara maruz kalmaktadır. Son yıllarda, makine öğrenimi teşhis ve hastalık ilerlemesini tahmin etme, klinik karar destek sistemlerinde ve optimal hasta bakımında önemli ilerlemeler kaydetmiştir.

Makine öğreniminin sağlık alanındaki rolünü, özellikle son COVID-19 pandemisi gibi sağlık krizleri sırasında, uygulamasının giderek daha hayati hale geldiği durumlarda incelemektedir. Kritik halk sağlığı sorunlarını, özellikle son pandemi, ele almak için çeşitli makine öğrenimi tekniklerini modelledik, makine öğrenimi modellerinin sağlık hizmetlerini iyileştirmedeki ve küresel sağlık krizlerinin etkilerini hafifletmedeki etkinliğini göstermeyi amaçladık. Makine öğrenimi terimi, önceden belirlenmiş matematiksel fonksiyonlar ve istatistiksel analizlere dayanan ve hasta verilerini giriş olarak kullanan yapay zekâ kategorisini ifade eder. Makine öğrenimi algoritmaları dört kategoriye ayrılır: denetimli, denetimsiz, yarı-denetimli ve pekiştirmeli öğrenme [1]. Makine öğrenimindeki son gelişmeler, sağlık hizmetleri uygulama ve karar verme alanlarında çeşitli ilerlemeler kaydedilmesine yardımcı olmuştur. Örneğin, COVID-19 pandemisi sırasında, virüsün yayılmasını sınırlamak için önemli çabalar gösterilmiştir; ancak bu önlemlere rağmen pek çok hayat kaybedilmiş ve ekonomik etkiler meydana

\* Sorumlu yazar: zeynep@binghamton.edu. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-0632-0905

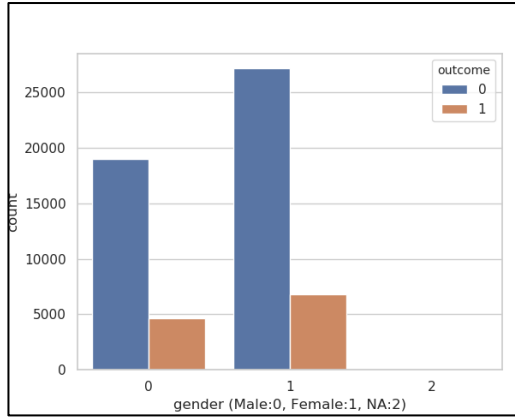


gelmiştir. Bu tür koşullarda, makine öğreniminin COVID-19'u izleme ve tanımlamada kullanılması, onun kontrol altına alınmasına yardımcı olabilir.

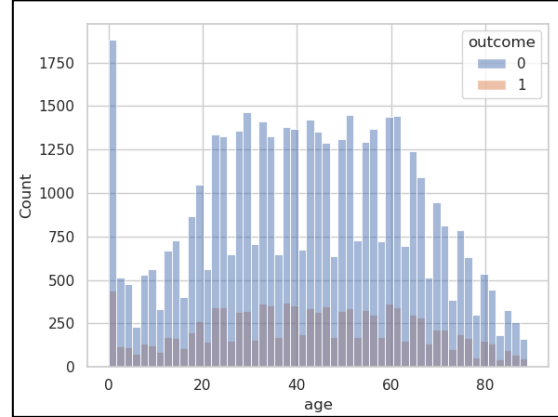
COVID-19 pandemisi hayatlarımızı dramatik bir şekilde etkiledi. COVID-19'un genomlarını anlamak ve pandeminin etkilerini hafifletmek için sürekli ve önemli çabalar olmasına rağmen, virüsün genlerinde meydana gelen mutasyonlar, gelişimini ve semptomlarını öngörülemez hale getiriyor. Bilim insanları, virüsün gelişimini izleyerek her mutasyondaki yayılma düzeyini ve potansiyel gelişmiş semptomları belirlemeye çalışıyor. COVID-19'un gelişimi ve mutasyonlarının yanı sıra, bu virüsün enfeksiyonu uzun vadeli etkiler yaratabilir; buna post-akut SARS-CoV-2 sekelleri (PASC) ya da uzun COVID denir. PASC/Uzun COVID semptomları göğüs ağrısı, öksürük, nefes almada zorluk, döküntü ve diğerlerini içerebilir. Ayrıca, son raporlar PASC/Uzun COVID'in semptom çeşitliliği içerdiğini göstermektedir. Şu anda PASC/Uzun COVID'in genel yayılma durumu kesin olarak bilinmemektedir. Ancak, son çalışmalar COVID-19'a yakalanmış kişilerin %50'den fazlasının en az bir PASC/Uzun COVID semptomu geliştirdiğini göstermektedir [2,3]. PASC/Uzun COVID'in yayılımını, süresini ve semptomlarını anlamak için çalışmalar devam etmektedir. Bazı çalışmalar, Uzun COVID'li hastaları tanımlamak için farklı yaklaşımlar önermiştir. Genel olarak, Uzun COVID tanısı hastalığın akut aşamasından sonra başlar ve semptomlar, kısa ve uzun COVID semptomlarını karakterize eden eski ve yeni semptomlar olmak üzere iki kategoriye ayrılır.

Yapay Zekâ (YZ), insanlığın bilişsel işlevlerini ve akıllı davranışlarını taklit eden güçlü bir araçlar yelpazesidir. YZ'nin iyi bilinen alt alanlarından biri, veri setlerinden karmaşık ilişkileri incelemek ve gizli desenleri tanımlamak için özel olarak tasarlanmış geniş bir algoritma yelpazesi içeren makine öğrenimidir. Sağlık alanında, özellikle COVID krizi sırasında, makine öğrenimi teknikleri, tıp endüstrisini ve sağlık uzmanlarını çeşitli hastalıkları tahmin etme, sağlık alanındaki gizli desenleri belirleme ve hastaları kümelendirme konusunda desteklemek için yaygın olarak uygulanmıştır. COVID pandemisi sırasında, makine öğrenimi teknikleri hastalığın gelişme olasılığını tahmin etmek ve COVID-19'un gelişimine neden olan faktörleri belirlemek için hızla uyarlanmıştır. Bu projede özel olarak, farklı makine öğrenimi tekniklerini kullanmayı amaçlıyoruz [4,5].

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, COVID-19 hastalarının teşhis, tespit ve sınıflandırılmasında Yapay Zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanılmasına yönelik yapılan farklı araştırmaları özetlemektedir. Makalenin metodolojisi Bölüm 3'te sunulmuştur. Bölüm 4, deneysel sonuçları tartışmaktadır. Son olarak, Bölüm 5 makaleyi sonuçlandırmakta ve birkaç gelecekteki yönü vurgulamaktadır.



Şekil 1. (a) Sonuç değişkenine göre cinsiyet dağılımı



(b) Sonuç değişkenine göre yaş dağılımı

## 2. Materyal ve Metot

Bu bölüm önce veri setinin kısa bir tanımını sunar, ardından uzun COVID gelişme olasılığını tahmin etmek için makine öğrenimi modelleri geliştirme metodolojisini tanıtır. Ana adımlar, giriş verisi işleme, özellik mühendisliği ve seçimi, model eğitimi ve model değerlendirmesi olarak ayrılabilir. Bir sonraki alt bölümler bu adımları daha detaylı bir şekilde açıklamaktadır.

## 2.1. Giriş verisi işleme

Giriş verisi, National COVID Cohort Collaborative (N3C) Veri Bölgesi tarafından sağlanmaktadır. N3C platformu, COVID-19 vakalarıyla doğrulanmış 6,3 milyon hasta ve olası COVID-19 vakalarıyla 168,937 hasta olmak üzere toplamda 16 milyonun üzerinde klinik kayıt sunmaktadır. Toplamda 19 milyardan fazla veri satırı bulunmaktadır ve 75 farklı siteye yayılmaktadır [6]. N3C, uyumlu EHR (Elektronik Sağlık Kayıtları) verilerine geniş erişim ve analiz imkanları sunarak, mevcut ve gelecekteki sağlık acil durumlarını aşabilecek işbirlikçi veri paylaşımı için yenilikçi bir model sunar. N3C'nin başlıca özellikleri arasında ulusal iş birliği ve yönetim, düzenleyici stratejiler, topluluk tarafından geliştirilen fenotiplere dayalı COVID-19 kohort tanımları, dört farklı veri modelinde veri uyumlaştırması ve ABD'den toplanan verilerin yenilikçi algoritmalarla işlenmesini destekleyen bir işbirlikçi analiz platformunun geliştirilmesi yer alır. N3C, COVID-19 verileri ile topluluk destekli, yeniden üretilebilir ve şeffaf analizler sunarak, sonuçların hızla paylaşılmasını ve atomik atamaların yapılmasını teşvik eder. Ayrıca, açık bilimin EHR verileri üzerinde büyük ölçekli olarak etkili bir şekilde uygulanabileceğini gösterir. Analitik platform veya N3C Enclave, Ulusal Çevirisel Bilimler Merkezi (NCATS) tarafından yönetilen güvenli bir bulut ortamında barındırılmakta olup, ABD genelindeki çeşitli merkezlerden Ocak 2018'den itibaren N3C COVID-19 fenotip kriterlerine uyan hastalardan alınan klinik verileri içermektedir. Gizliliği koruyan kayıt bağlantıları, görüntüleme, genomik veya klinik deneme verileri gibi diğer veri setleri ile ek düzenleyici onaylarla ilişkilendirilmek üzere geliştirilecektir. Ayrıca, N3C, algoritmalar kullanılarak türetilmiş sentetik veri setlerinin oluşturulmasını pilot olarak gerçekleştirecektir. N3C verileri, araştırmacılara COVID-19 ile ilgili geniş çaplı analizler yapma fırsatı sunar [13].

Her bir site, hasta demografisi, tıbbi geçmişi ve laboratuvar ölçüm sonuçları gibi bilgileri temsil eden Kişi, Gözlem ve Ölçüm tabloları gibi tekil tablolardan oluşmaktadır. Bu adımda, şekilde belirtilen veri sitelerini dahil ettik ve COVID-19 aşı durumu, hastalık durumları ve ilaç geçmişi gibi bazı temel koşullara dayalı olarak tabloları kademeli olarak birleştirmeye başladık.

## 2.2. Özellik mühendisliği ve seçimi

Giriş tabloları işlendikten sonra, 51 yeni özellik çıkarılmıştır. Bu özellikler, yaklaşık 60,000 hastanın yaş ve cinsiyet gibi bazı statik bilgilerini, Kardiyomiyopatiler ve Diyabet gibi çeşitli hastalık göstergelerini ve antibiyotikler ve antiviral ilaçlar gibi hastaların ilaç geçmişini içermektedir. Bu özelliklerin çoğu, bazı hastalıklar veya durumlar için ikili değerler alır. Bu adımın amacı, modelimize mümkün olduğunca ilgili bilgi sağlamaktır. Ayrıca, modelimizin hastaların statik bilgileri, sağlık ve hastalık durumu ve ilaç geçmişinin Uzun COVID hastalığı geliştirme olasılığı üzerindeki etkilerini yakalamasını hedeflemekteyiz.

## 2.3. Model eğitimi ve değerlendirme

Model eğitimi aşamasında, Uzun COVID olasılığını tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi modelleri oluşturulmuştur. Problemin doğası, konuları post-akut semptomlar geliştirip geliştirmeyecekleri olarak sınıflandırmak olduğundan, denetimli öğrenme algoritmalarına, özellikle sınıflandırma algoritmalarına odaklandık. Kullandığımız algoritmalar şunlardır: Destek Vektör Makineleri (SVM), Lojistik Regresyon sınıflandırıcısı (LR) ve Karar Ağacı Sınıflandırıcısı (DT). Bu algoritmalar ayrıca giriş verilerindeki değişkenlerin önemini de belirtebilir. Bu algoritmalar makine öğrenmesinde en sık kullanılan tekniklerdir.

**Destek Vektör Makinesi (SVM)**, [14,16] sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan denetimli bir makine öğrenimi algoritmasıdır. SVM'nin temel fikri, farklı sınıflara ait veri noktalarını maksimum marj ile ayıran optimal hiper düzlemi bulmaktır.

- **Hiper Düzlem:** n-boyutlu bir uzayda, hiper düzlem n-1 boyutunda düz bir afine alt uzaydır. Örneğin, 2-boyutlu bir uzayda hiper düzlem, farklı sınıfları ayıran bir doğrudur.
- **Marj:** Marj, hiper düzlem ile her sınıftan en yakın veri noktaları (destek vektörleri olarak bilinir) arasındaki mesafedir. Bu marjın maksimize edilmesi, modelin genelleme kapasitesini artırır.
- **Kernel Kurnazlığı:** SVM, doğrusal olarak ayrılmayan verileri daha yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürerek bu verilerle daha etkili bir şekilde başa çıkabilir. Bu dönüşüm, polinom, radyal temel fonksiyon (RBF) ve sigmoid gibi Kernel fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilir.

**Lojistik Regresyon** [15, 17], sonucu iki olası sınıftan biri olan ikili sınıflandırma problemleri için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Verilen bir girişin belirli bir sınıfa ait olma olasılığını lojistik fonksiyon kullanarak tahmin eder.

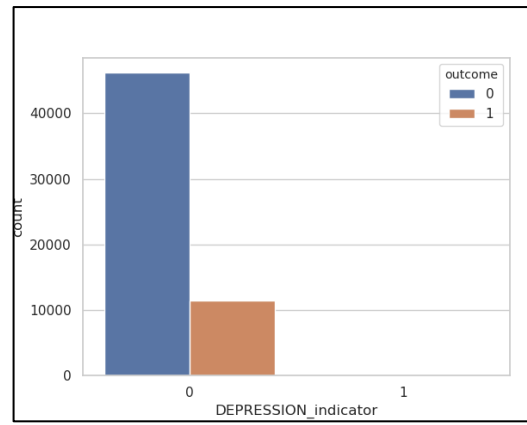
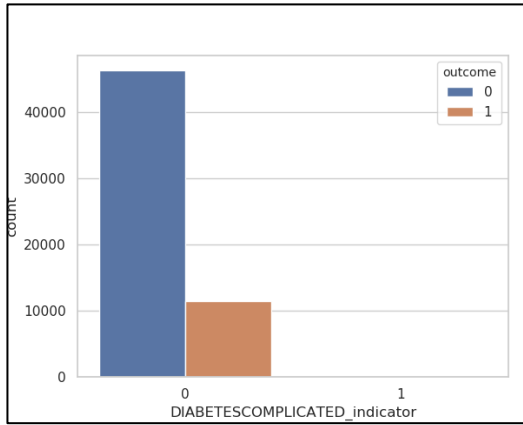
**Karar Ağaçları** [16, 19, 20], sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan parametrik olmayan bir denetimli öğrenme yöntemidir. Bir karar ağacı modeli, veri kümesini giriş özelliklerinin değerlerine göre alt kümelerine ayırarak, her iç düğümün bir özellik testini, her dalın bir test sonucunu ve her yaprak düğümün bir sınıf etiketini veya regresyon değerini temsil ettiği ağaç benzeri bir yapı oluşturur. Özetle, **SVM** sınıfları ayırmak için maksimum marj ile bir hiper düzlem bulmaya odaklanır, **Lojistik Regresyon** lojistik fonksiyon kullanarak olasılıkları tahmin eder ve genellikle ikili sınıflandırma için kullanılır, **Karar Ağaçları** ise kararların ve olası sonuçlarının ağaç benzeri bir modelini sunar. Her teknik kendi güçlü yönlerine sahiptir ve veri ve sorunların özel özelliklerine göre seçilir.

Modellerin performansını değerlendirmek için birkaç ölçüt kullandık: doğruluk, kesinlik, özgüllük, duyarlılık ve F1 skoru [7]. Doğruluk, modelin genel tahmin gücünü ölçer. Ancak, her zaman modelin performansını iyi bir gösterge olmayabilir. Bu nedenle, Uzun COVID modellerini doğru bir şekilde değerlendirmek için ek metrikler göz önünde bulundurduk. Yani, duyarlılığı, özgüllüğü, kesinliği ve F1 skorunu dikkate aldık.

### 3. Bulgular

Tahmin modellerimizin deneysel sonuçları bu bölümde sunulmuştur. İlk olarak, giriş özelliklerinin sonuç değişkeni üzerindeki etkisini incelemek için bazı açıklayıcı veri analizleri gerçekleştirdik. Ardından, modellerin performansını daha önce belirtilen performans ölçütleri kullanarak değerlendirdik.

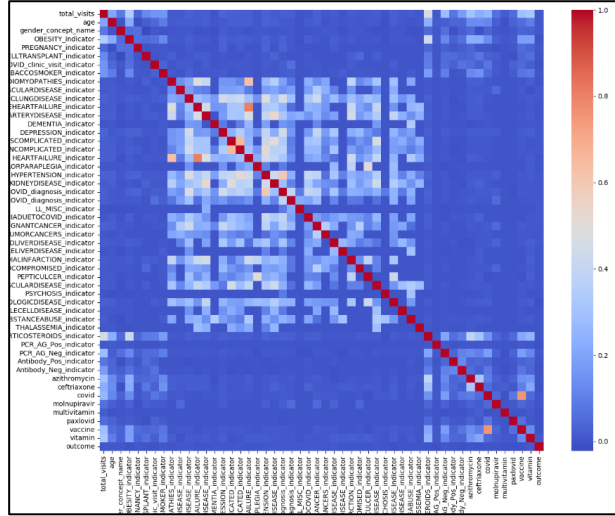
Şekil 1, cinsiyetin sayısını ve yaşın dağılımını sonuç değişkeni açısından göstermektedir. Şekilden de görebileceğimiz gibi, verilerde erkeklerden daha fazla kadın bulunmaktadır ve bu durum, Uzun COVID tanısı konan kadın sayısının erkeklerden fazla olduğunu göstermektedir. Yaş açısından, çok genç yaş grubunun (2 yaşa kadar) diğer yaş aralıklarına göre baskın olduğunu görebiliyoruz. Ancak, bu iki özelliğin gerçekten sonuç değişkenini etkileyip etkilemediğini henüz çıkaramıyoruz.



Şekil 2. (a) Sonuç değişkenine göre şeker hastalığı dağılımı

(b) Sonuç değişkenine göre depresyon dağılımı.

Şekil 2, şeker hastalığı ve depresyon hastalık göstergelerinin sonuç değişkenine göre dağılımını göstermektedir. Şekilde de belirtildiği gibi, yüksek veri dengesizliği nedeniyle herhangi bir sonuca varamıyoruz. Şekil 3, tüm değişkenler arasındaki korelasyon grafiğini göstermektedir. Bazı hastalık göstergelerinin yüksek korelasyon gösterdiği açıktır. Ancak, bizim esas ilgilendiğimiz nokta, giriş özellikleri ile sonuç değişkenleri arasındaki korelasyonu yakalamaktır. Verinin büyük boyutu ve veri dengesizliği problemi nedeniyle bu etkileri yakalayamıyoruz ve bu, şekilde de açıkça görülmektedir.



Şekil 3. Korelasyon grafiği.

Verilerimiz, Uzun COVID hastalarının sayısı açısından yüksek derecede dengesiz olduğu için doğruluk, modellerin performansını iyi bir gösterge olarak kabul edilemez. Bu nedenle, Uzun COVID hastalarını tanımlama açısından modelin performansını daha doğru bir şekilde açıklamak için duyarlılık, özgülük, kesinlik ve F1 skoru da kullanılmıştır. Tablo 1, Uzun COVID modellerinin performansını özetlemektedir. Eğitim veri seti açısından, DT en iyi performansı sergileyerek %85 geri çağırma (Recall) oranı elde etmiştir. Test veri seti açısından ise, %80 geri çağırma oranı ile SVC en iyi performansı göstermiştir.

Tablo 1. Performans Değerlendirmesi.

		Doğruluk	Kesinlik	Geri Çağırma (Recall)	F1 Skoru
Özellik seçimi olmadan	Lojistik Regresyon	0,8	0,69	0,49	0,54
	Karar Ağaçları	0,85	0,89	0,85	0,86
	Karar ağacı sınıflandırması (SVC)	0,82	0,8	0,82	0,86
Özellik seçimli	Lojistik Regresyon	0,48	0,68	0,48	0,54
	Karar Ağaçları	0,62	0,69	0,62	0,65
	Karar ağacı sınıflandırması (SVC)	0,8	0,67	0,8	0,72

#### 4. Tartışma

Son araştırmalara göre [8, 9], COVID-19 vakalarının tespiti ve uç bilgi işlem alanında yürütülen üç farklı çalışma akışı bulunmaktadır. İlk akış, tıp görüntüleme analizi ile COVID-19'u tanımlamak için içgörümü desenler çıkarmaya çalışan radyologlar için yararlı olan görüntü verilerinin analizini içermektedir. İkinci akış, COVID-19'un yeni fenotip sınıflandırmasının tespitini, tanı koymayı ve ölüm oranını nasıl minimize edebileceğine dair içgörüler sağlayan modeller geliştirmeyi kapsamaktadır. Üçüncü akış ise, özellik çıkarımı ve derin öğrenme tekniklerini kullanan çerçeveler aracılığıyla COVID-19'un otomatik sınıflandırılması için teknikleri içermektedir.

[10] araştırmacıları, COVID-19 hastalarının sonunda ventilasyon ihtiyacı olup olmayacağını tahmin etmek için bir lojistik regresyon sınıflandırma modeli kullanmıştır. Geliştirilen metodoloji, çok merkezli klinik ortamlarda uygulanmış ve COVID-19 hastalarının 24 saatlik bir süre içinde invaziv mekanik ventilasyon ihtiyaçlarını tahmin etme doğruluğuna göre değerlendirilmiştir. Deney, COVID-19 tanısı almış ve beş farklı Amerika Birleşik Devletleri sağlık sistemine kabul edilmiş 197 hastayı içermektedir. Araştırmacılar, geliştirilen modeli (MLA) Modified Early Warning Score (MEWS) adı verilen bir erken uyarı sistemi ile karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlar, makine öğrenme algoritmasının (MLA) MEWS'e göre %78 olan duyarlılık oranını %90'a çıkardığını göstermiştir. Ayrıca, MLA %58 spesiflik oranı elde etmişken, MEWS'de bu oran %40'tır.

COVID-19'daki makine öğreniminin bir diğer yönünde, [11] araştırmacıları, COVID-19 tanısı almış veya şüphelenilen hastaların entübasyon gerektirip gerektirmeyeceğini tahmin etmek için bir derin öğrenme modeli geliştirmiştir. Çalışma, 2020 yılında beş farklı hastaneye kabul edilen 4087 hastayı kapsamaktadır. Bu hastalardan %11'i entübasyon gerektirmiş ve bu durum dengesiz sınıflara yol açmıştır. Hastanelerde ventilatör eksikliği nedeniyle, çalışma sağlık çalışanlarının risk yönetimini iyileştirmek ve entübasyon gerektirecek COVID-19 hastalarını tahmin etmek için bir makine öğrenme modeli geliştirmeyi hedeflemiştir. Geliştirilen makine öğrenme modeli, mekanik ventilasyon tahmini için iyi bir şekilde yerleşmiş bir araç olan ROX indeksi ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen modelin ROX indeksini geride bıraktığını ve geliştirilen modelin 0,84 AUC, ROX indeksinin ise 0,64 AUC elde ettiğini göstermiştir. Ayrıca, deneysel sonuçlar, geliştirilen modelin precision-recall eğrisinin 0,30, ROX indeksinin ise 0,13 olduğunu ortaya koymuştur.

PASC/Uzun COVID açısından, uzun COVID gelişme olasılığını tahmin etmek için makine öğrenme modellerinin geliştirilmesini teşvik eden araştırmalar henüz gelişmektedir. NIH, bu özel amaç için bir yarışma başlatmıştır. NCATS Ulusal COVID Kohort İş Birliği (N3C) Veri Bölgesi, COVID-19 ve PASC/Uzun COVID hastalarını içeren veri setini sağlayacaktır [6]. N3C Veri Bölgesi, merkezi, güvenli ve ulusal klinik veriler sunan bir platformdur. Ayrıca, N3C Veri Bölgesi, COVID-19 risk faktörlerini ve uzun vadeli sonuçlarını incelemeyi amaçlayan araştırma topluluğu için güçlü analitik araçlarla donatılmıştır. Veri henüz sağlanmamıştır ve yalnızca N3C Veri Bölgesi platformu aracılığıyla erişilebilir. Veri seti, COVID-19 hastalarına ait bilgileri, demografik veriler, işlemler, semptomlar, laboratuvar sonuçları, ilaçlar, fiziksel ölçümler ve daha fazlasını içerecektir [6]. Veri setinde 15 milyon üzerinde hastaya ait bilgi bulunmaktadır ve bu, 17,5 milyar veri satırını temsil etmektedir. Ayrıca, veriler 5,8 milyon COVID pozitif hastayı içermekte olup, hastaların gizliliğini korumak amacıyla kimlik bilgileri çıkarılmıştır. Verinin genişlik ve derinlik karmaşıklığını karşılamak için, mevcut veri çeşitliliğinden yararlı içgörüler elde etmek için ileri düzey analitik teknikler gerekmektedir. Bu projede, ana motivasyonumuz, daha önce COVID-19 tanısı almış hastaların PASC/Uzun COVID geliştirme olasılığını belirleyebilen makine öğrenimi modelleri geliştirmektir. Geliştirilen modellerin sağlık sektöründe karar destek mekanizması olarak entegrasi sağlık politikalarını geliştirecek ve hastalıklarla mücadelede daha öngörülü bir politika sağlayacaktır.

## 5. Sonuçlar

Bu makale ile Makine öğreniminin sağlık hizmetlerini devrim niteliğinde değiştirmedeki anahtar rolünü, özellikle COVID-19 pandemisi gibi sağlık krizleri bağlamında ortaya koyuyoruz. Sonuç olarak, Yapay Zekâ ve makine öğrenimi, COVID krizi sırasında güçlü araçlar olarak kendilerini kanıtlamıştır. Bu projede, Uzun COVID hastalığını geliştirme olasılığını tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi modelleri geliştirdik. En iyi model, Uzun COVID'i tahmin etme konusunda %80 doğruluk oranı elde etmiştir. Ancak, hala iyileştirme için bazı alanlar bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, eksik veri problemini ele almak için daha eğitilmiş stratejiler kullanmayı planlıyoruz. Ayrıca, özellik mühendisliği metodolojimizi daha bilgilendirici özellikleri içerecek şekilde genişletmeyi düşünüyoruz. Son olarak, veri dengesizliği sorununu ele almak için bazı teknikleri de entegre etmeyi planlıyoruz.

Sağlık krizleri sırasında kritik halk sağlığı sorunlarını ele almadaki makine öğreniminin hayati rolü incelenmektedir. Makine öğrenimi teknikleri, büyük miktarda hasta verisini analiz etme yetenekleri ve teşhis, hastalık ilerlemesi tahmini ve klinik karar destek sistemleri için değerli içgörüler üretme kapasiteleri nedeniyle sağlık alanında giderek daha fazla benimsenmiştir. Bu gelişmeler, çeşitli hastalıklar ve semptomların karmaşıklıklarıyla ilişkili hataları azaltarak ve hasta bakımını optimize ederek sağlık hizmetlerinin sunumunu geliştirmede kritik öneme sahiptir. Farklı makine öğrenimi tekniklerini modelleyerek, bu yetenekleri küresel sağlık krizleri sırasında halk sağlığı yönetimindeki gerçek hayattaki sorunları ele almak için kullanmayı amaçlamaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar [20] Lojistik Regresyon, Karar Ağaçları ve Karar Ağacı Sınıflandırması tekniklerinin en çok kullanılan metotlar olduğunu göstermiştir [21-24]. Bu sebeple bu 3 algoritma seçilmiş ve bu araştırma, hastalık tahmininde farklı denetimli makine öğrenimi algoritmalarının karşılaştırmalı performanslarını incelemeyi amaçladı. Klinik veriler ve araştırma kapsamı hastalık tahmini çalışmalarında geniş ölçüde farklılık gösterdiğinden, yalnızca veri seti ve kapsam üzerinde ortak bir kıyaslama kriteri belirlendiğinde karşılaştırma

yapılabilmiştir. Bu nedenle, karşılaştırma için aynı veri ve hastalık tahmini üzerinde birden fazla makine öğrenimi yöntemi uygulayan çalışmalar seçildi.

### Kaynaklar

- [1] Ahsan M. M., Luna S. A., Siddique Z. Machine-learning-based disease diagnosis: A comprehensive review. In *Healthcare*, 2022, 10: 541.
- [2] Silva Andrade B, Siqueira S, de Assis Soares WR, de Souza Rangel F, Santos NO, dos Santos Freitas A, Ribeiro da Silveira P, Tiwari S, ve diğerleri. Long-COVID and post-COVID health complications: an up-to-date review on clinical conditions and their possible molecular mechanisms. *Viruses*, 2021; 13(4): 700.
- [3] <https://portal.challenge.gov/public/previews/>
- [4] Raveendran AV, Jayadevan R, Sashidharan S. Long COVID: An overview. *Diabetes Metab Syndr* 2021; 15(3): 869-875.
- [5] Syeda HB, Syed M, Sexton KW, Syed S, Begum S, Syed F, Prior F, Yu Jr F. Role of machine learning techniques to tackle the COVID-19 crisis: systematic review. *JMIR Med Inform* 2021; 9(1): 23811.
- [6] <https://covid.cd2h.org/enclave>
- [7] Dwivedi AK. Performance evaluation of different machine learning techniques for prediction of heart disease. *Neural Comput & Applic* 2018; 29(10): 685-693.
- [8] Kwekha-Rashid AS, Abduljabbar HN, Alhayani B. Coronavirus disease (COVID-19) cases analysis using machine-learning applications. *Appl Nanosci* 2021.1-13.
- [9] Alimadadi A, Aryal S, Manandhar I, Munroe PB, Joe B, Cheng X. Artificial intelligence and machine learning to fight COVID-19. *Physiological genomics*, 2020; 52(4): 200-202.
- [10] Burdick H, Lam C, Mataraso S, Siefkas A, Braden G, Dellinger RP, McCoy A, Vincent JL, ve diğerleri. Prediction of respiratory decompensation in Covid-19 patients using machine learning: The READY trial. *Comput Biol and Med* 2020; 124: 103949.
- [11] Arvind V, Kim JS, Cho BH, Geng E, Cho SK. Development of a machine learning algorithm to predict intubation among hospitalized patients with COVID-19. *J Crit Care*, 2021; 62:25-30.
- [12] Haendel MA, Chute CG, Bennett TD, Eichmann DA, Guinney J, Kibbe WA, Payne PR, Pfaff ER, Robinson, PN, Saltz JH and Spratt H, The National COVID Cohort Collaborative (N3C): rationale, design, infrastructure, and deployment. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2021, 28(3): 427-443
- [13] Vishwanathan, SVM, Murty MN, May. SSVM: a simple SVM algorithm. In *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02*, 2002, 3: 2393-2398
- [14] Kleinbaum, DG, Dietz K, Gail M, Klein, M. and Klein, M., *Logistic regression*, 2002, New York: Springer-Verlag.
- [15] Rokach L and Maimon O. *Decision trees. Data mining and knowledge discovery handbook*, 2005.
- [16] Hosmer Jr DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. *Applied logistic regression*. Wiley; 2013.
- [17] Joachims T. *Making large-scale SVM learning practical*. SFB 475: Komplexitätsreduktion Multivariaten Datenstrukturen, Univ. Dortmund, Dortmund, Tech. Rep. 1998.
- [18] Quinlan JR. *Induction of decision trees*. *Mach Learn*. 1986, 1(1):81-106.
- [19] Cruz JA, Wishart DS. *Applications of machine learning in cancer prediction and prognosis*. *Cancer Informat*. 2006, 2:59-77.
- [20] Uddin S, Khan A, Hossain ME and Moni MA, 2019. Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction. *BMC medical informatics and decision making*, 19(1):1-16.
- [21] Aneja S, Lal S. *International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC) 2014*. Effective asthma disease prediction using naive Bayes—Neural network fusion technique.
- [22] Ahmad LG, Eshlaghy A, Poorebrahimi A, Ebrahimi M, Razavi A. Using three machine learning techniques for predicting breast cancer recurrence. *J Health Med Inform*. 2013, 4(124):3.
- [23] Chen M, Hao Y, Hwang K, Wang L, Wang L. Disease prediction by machine learning over big data from healthcare communities. *IEEE Access*. 2017, 5:8869-8879.
- [24] Yang J, Yao D, Zhan X, Zhan X. *International Symposium on Bioinformatics Research and Applications*. 2014. Predicting disease risks using feature selection based on random forest and support vector machine.



## A Modeling Approach for Cargo Transportation Considering Energy Saving

Sevcan EMEK<sup>1\*</sup>, İsmail TOSUN<sup>2</sup>, Mehmet Emre YILMAZ<sup>3</sup>, Zafer SAY<sup>4</sup>, Yusuf Burak PEKER<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Turkey  
\*<sup>1</sup> sevcan.emek@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 17/04/2024;

Kabul/Accepted: 27/09/2024)

**Abstract:** This study presents a cargo transportation system management model that enables users to carry out the cargo process efficiently and economically. Cargo transportation is an important part of the transportation systems network. The advantages of cargo transportation are to ensure the safe delivery of products, save time and reduce costs. This study addresses the solution to the problems of high carbon dioxide emissions, and late and expensive deliveries caused by large distribution networks, by taking into account the density and logistics strategies of the cargo companies. The proposed cargo management system focuses on delivering cargo to destinations along the route that users are currently traveling on. This system is built around three main components: optimized route planning by an A\* algorithm, a system model controllable through mobile and web interfaces, and nodes designated as drop-off and pick-up points for cargo. The A\* algorithm runs with a reward matrix that also takes direction into account to calculate the optimal route. Users carry out the cargo management and tracking processes on mobile and web interfaces. Automatic nodes, which are the model prototype of the study, represent the cargo vending machines where users deliver/receive their cargo. Through this work, users can view and select cargo to carry while traveling between destinations and earn profits by acting as cargo carriers/drivers.

**Key words:** Cargo transportation system management model, A\* algorithm, route planning, automatic node.

### Kargo Taşımacılığında Enerji Tasarrufuna Dayalı Bir Modelleme Yaklaşımı

**Öz:** Bu çalışma, kullanıcıların kargo sürecini verimli ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirmelerini imkan sağlayan bir kargo taşımacılığı sistemi yönetim modeli sunmaktadır. Kargo taşımacılığı, ulaşım sistemleri ağının önemli bir parçasıdır. Kargo taşımacılığının avantajları, ürünlerin güvenli bir şekilde teslim edilmesini sağlamak, zamandan tasarruf etmek ve maliyetleri azaltmaktır. Bu çalışma, kargo şirketlerinin yoğunluk ve lojistik stratejilerini dikkate alarak, büyük dağıtım ağlarının neden olduğu yüksek karbondioksit emisyonları, geç ve pahalı teslimatlar sorunlarına çözüm getirmektedir. Önerilen kargo yönetim sistemi, kullanıcıların şu anda seyahat ettiği rota üzerindeki varış noktalarına kargo teslim etmeye odaklanmaktadır. Bu sistem üç ana bileşen etrafında oluşturulmuştur: A\* algoritması tarafından optimize edilmiş rota planlaması, mobil ve web arayüzleri aracılığıyla kontrol edilebilen bir sistem modeli ve kargo için bırakma ve alma noktaları olarak belirlenmiş düğümlerdir. A\* algoritması, optimum rotayı hesaplamak için yönü de hesaba katan bir ödül matrisi ile çalışır. Kullanıcılar, kargo yönetimi ve izleme süreçlerini mobil ve web arayüzleri üzerinden gerçekleştirmektedir. Çalışmanın model prototipi olan otomatik düğümler, kullanıcıların kargolarını teslim ettikleri/aldıkları kargo satış makinelerini temsil eder. Bu çalışma sayesinde kullanıcılar, varışlar arası seyahat ederken taşıyacakları kargoyu görüntüleyip seçebilecek ve kargo taşıyıcısı/sürücüsü olarak hareket ederek kazanç elde edebileceklerdir.

**Anahtar kelimeler:** Kargo yönetimi sistem modeli, A\* algoritması, rota planlama, otomatik düğüm.

### 1. Introduction

Cargo transportation is an important development unit of the transportation and logistics sector. Cargo transportation aims to deliver goods or loads sent or carried by a transportation vehicle from one place to another safely and quickly. The processes of sending and receiving cargo have become a part of people's daily routine. People use cargo transportation as an interface to meet their needs. In this way, the transportation sector has become important in meeting the demands of customers. Transportation systems enable people to improve their quality of life on a global scale. It is also expected to provide environmental, social and economic benefits [1-4].

The transportation and logistics sector needs to use energy resources efficiently for sustainability. There is a direct relationship between transportation and energy. This relationship can be evaluated from a cost-benefit perspective. Transportation agents (passengers, cargo, information, etc.) need a proportional amount of energy. Energy consumption in the transportation sector accounts for more than 20% of world energy consumption [5-7]. Transportation activities can have harmful effects such as noise pollution, air pollution, traffic congestion, etc. It

\* Sorumlu yazar: [sevcan.emek@cbu.edu.tr](mailto:sevcan.emek@cbu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0003-2207-8418, <sup>2</sup>0009-0007-6884-572X, <sup>3</sup>0009-0004-3316-6063, <sup>4</sup>0009-0001-0537-7101, <sup>5</sup>0009-0007-1252-3799



is heavily dependent on energy-intensive petroleum products, primarily gasoline and diesel. It causes greenhouse gas emissions and air pollution, which are the leading causes of global warming [8, 9].

The logistics sector is growing rapidly. Transportation systems need transformations that are compatible with time, cost, and environmental conditions [10, 11]. For this, it is necessary to use technology and digital platforms at a high level. In addition, it is very important to use artificial intelligence (AI) methods to keep up with the competition in the sector [12, 13]. Logistics companies can operate their management models more efficiently by using AI methods; for example, generating leads, maintaining customer and service relationships, and automating sales and marketing tasks [14-16]. AI-supported management models help logistics companies simplify complex structures, increase customer satisfaction, generate profits, and reduce environmental damage. In the logistics sector, computer-based computing is used to control and manage the flow of services throughout the supply chain [17, 18]. Shippers can optimize the transportation route between product locations and destinations. Many processes can be monitored using AI-powered data-driven analytics; for example, the safe delivery of shipments, anticipating potential problems, and preventing delays. AI offers significant advantages in route planning. For example, it can take into account many variables such as traffic density, weather conditions, and finding the shortest route. Unlike traditional route planning methods, it can optimize routes depending on the real-time conditions. In this way, delivery times of cargoes are reduced, and time and energy are saved.

This work aims to benefit users by proposing a cargo transportation management system considering time, energy and cost. With this system, users provide cargo transportation services and can earn green coin. Users carry out the cargo management and tracking processes on mobile and web interfaces. This work also presents a prototype model representing a cargo vending machine where users deliver/pick up their cargo. This study proposes a modern cargo transportation system. Users can observe transfer points with the suggested route planning algorithm. This system helps reduce environmental impacts by allowing routes that consume less fuel to be determined. It allows for more efficient use of routes and avoids unnecessary energy consumption. This both reduces costs and protects the environment. This study proposes a good infrastructure to increase competitiveness in the sector. It provides daily work opportunities to users, especially due to the increase in demand for the cargo sector with the spread of e-commerce. This model has a computer-based calculation method. Therefore, it is different from current cargo transportation systems. Another feature that distinguishes it from existing systems is that users can also be included in the system. In this way, the user earns green coin through the system as a cargo carrier.

In this model, the activities of the agents consist of the interaction between the cargo carrier and the user. The design and authorization of the nodes where users drop off and pick up their cargo provides the hardware infrastructure of this management model. This model uses an optimized A\* algorithm for route planning. This algorithm minimizes unnecessary trips by utilizing existing traffic patterns, reducing both time and energy consumption. The system integrates mobile and web interfaces for real-time management and control, while also featuring automatic nodes as drop-off and pick-up points. Authorization at the drop off and pick up nodes of the cargo is carried out by the interaction of the cargo carrier and the user. By encouraging users to transport cargo along their pre-planned routes, the model promotes sustainable logistics operations.

As a contribution of this study; a) it encourages users to carry cargo along pre-planned routes, b) the model creates infrastructure for sustainable logistics operations, c) it is designed with a management system approach to reduce carbon dioxide emissions, d) the users of the system are also in the role of cargo carriers. If there is a user who is already going from one place to another, he can deliver cargo on his route. In this way, it both contributes to energy saving and earns green coin, e) it offers a scalable solution for future integration with green technologies such as electric vehicles.

The rest of this study is organized as follows: Section 2 offers a literature review of the technology-based transportation and logistics industry. The technology applied to this model and the developed methods are presented in Section 3. The parts of the cargo transportation system management model, the algorithm developed for the route planning, and the parameters of the model are explained in Section 4. Finally, the conclusions of this study are discussed in Section 5.

## 2. Literature Review

Studies suggest that computer-based computations combined with AI offer significant improvements to supply chain and logistics operations. Technology and high computational methods provide substantial benefits in logistics operations, including energy and cost savings, reduced workforce activities, increased security and quality of service, faster deliveries, optimized routes and customer satisfaction.

Transportation activities have negative impacts on the environment, such as noise and air pollution, traffic congestion, infrastructure erosion and carbon dioxide emissions, etc. [7]. The transportation sector has a significant impact on world energy consumption. Considering the environmental side effects of transportation

activities, the methods to reduce energy consumption are needed to ensure sustainable growth of transportation sector [7, 19]. The increasing population in urban areas, directs the exploration of efficient ways of sustainable freight transportation. The intensive use of the existing infrastructure by transportation activities reveals the need to increase urban delivery points [20, 21]. Energy management methodologies, incentives the adoption of hybrid vehicles and models for delivery time are suggested for energy and cost savings in the sector [22-25]. The effect of pollutant emissions on the route planning of vehicles enables the design of new route models and the development of optimization algorithms [26].

As in other sectors, it becomes a necessity to take advantage of AI for operational competence in terms of productivity, efficiency and speed in the transportation sector. AI systems facilitate many processes, such as supply chain planning, automation, capacity planning, dataset analysis, etc. One of the most popular applications of AI techniques has been towards solving transportation network design problems. These problem classes include traveling salesman problem (TSP), vehicle routing and scheduling, minimum spanning tree, load aggregation, intermodal connection and road network problems [27, 28]. Other applications of AI in the transportation sector can be listed such as logistics planning, warehousing management system, software robots, autonomous robots, damage detection, self-driving vehicles, automating document processing, etc. [29].

Today, different measures are being investigated to solve the problem of a sustainable urban cargo transportation [13, 30]. Studies in the literature indicate that the load capacity is an important parameter in the inclusion of electric vehicles in the load carrying system [31, 32]. Electric and hybrid vehicles have shown potential to reduce fuel consumption and emissions, particularly when integrated into urban freight transport systems [33]. Heavy vehicles used in transportation both cause air pollution and adversely affect urban life [34]. This model offers a solution to reduce the vehicle traffic network of cargo companies.

Examining similar studies reveals that the program known as Amazon Flex allows Amazon to expand its distribution network, increase deliveries during high demand periods such as "Black Friday" and speed up relevant delivery for customers [35]. Amazon Flex, where people have the chance to earn additional income in various countries such as United States of America, was established as a subsidiary of Amazon with its own package distribution system. It is an application that mediates customers to pick up products they purchased from online retailers, employs them as courier-mediators, and provides income for users. Uber Freight is a platform that connects truck drivers with companies that need cargo delivered. Similar to this model, it optimizes routes and cargo transportation based on real-time demand. While Uber Freight is more focused on professional truck drivers rather than everyday users, the core idea of optimizing routes and reducing inefficiencies in the logistics process aligns with this approach [36]. CargoX is a blockchain-based platform for smart bill of lading (B/L) management. It allows for more secure and efficient cargo transportation by automating documentation processes, ensuring faster and more transparent logistics. CargoX focuses on document management and security in logistics. Shiplly is an online marketplace where people can list items they need to transport, and transport providers offer quotes [37]. The model encourages transport providers to take on additional deliveries along their existing routes, reducing the need for extra trips. This allows to users to act as cargo transporters along their own routes. Convoy is a digital freight network that uses technology to improve the efficiency of truckloads by optimizing the routes drivers take. Convoy employs machine learning to reduce empty miles (when trucks drive with no cargo) and to maximize route efficiency [38]. These examples offer similar features to our proposed system for optimizing cargo transportation in terms of technology, user involvement, and environmental sustainability. There is a need to a management model to eliminate or minimize the adverse factors encountered during transportation activities. A transportation management model must consider many factors; energy and cost savings, customer supply demand, a sustainable supply chain, and an efficient transportation process. This proposed system proposes a management model to cover all these components.

### 3. Technique and Technologies

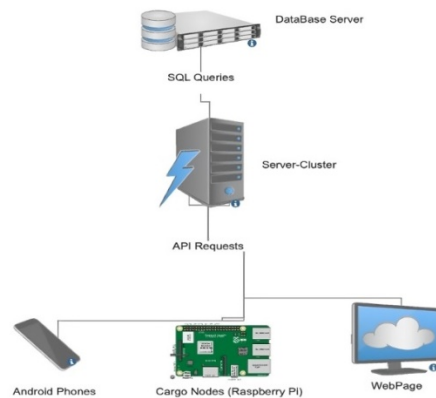
In this study, a RESTful API based Python Flask application was used to build a management system. Representational State Transfer (REST) is an architectural style that uses HTTP methods for communication between client and server. The RESTful API allows for easy communication between different components of the system. It enables the development of a flexible and modular architecture. In the proposed model, the RESTful API facilitates communication between different components like the mobile and web interfaces with the central server. Google Maps API was integrated into the system to provide a range of location-based services such as route planning and tracking of cargo shipments. The API allows cargo transporters to display maps, plot locations and create routes on the map. To create alternative routes for the model, an optimized A\* algorithm was developed. This algorithm facilitates more efficient and cost-effective transportation planning by considering factors such as traffic, weather conditions, and road closures. To further improve the scalability and reliability of the system, the server application was packaged as a docker container and run it on an auto-scalable

server using Kubernetes. This allows the system to automatically scale up or down as the number of users and cargo shipments increases or decreases, providing a more efficient and cost-effective solution. MYSQL, a relational database management system, was implemented as a Docker container. Docker is a containerization platform that allows packaging of the application and its dependencies into a single container, making it easier to deploy and run the system on different environments without compatibility issues. In this model, Docker is employed to package the server application, ensuring that the system is portable, secure, and easy to deploy on different infrastructures. By using the Docker, it is possible to have full control over the data and to ensure system security and reliability. The database can be easily scaled as needed to accommodate the growing number of users and cargo shipments.

In the mobile module of the system, the Android Studio platform was used to create android applications. This platform provides a comprehensive set of tools for developing, debugging and testing android applications. To ensure the security of user data, data encryption techniques were implemented. This means that the user data stored on the mobile device or on the server is encoded. It can only be accessed by authorized parties with the correct decryption key. This added security measure helps to protect the sensitive information of users and prevent any unauthorized access or breaches. A Raspberry Pi was used as the mechanism to control the nodes to simulate the system.

#### 4. System Management Model

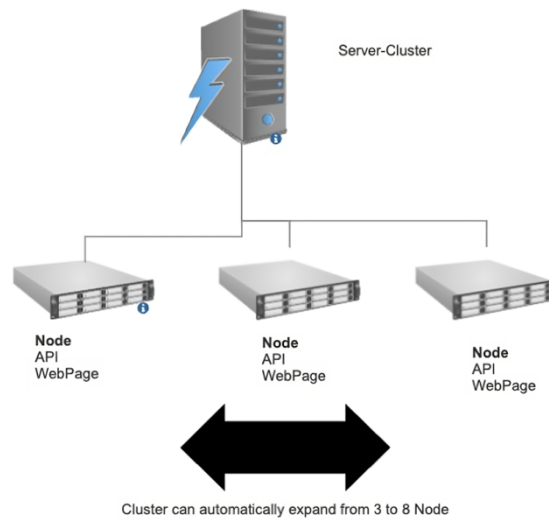
The system management model includes four main components; server, automatic node, web and mobile parts (Figure 1).



**Figure 1.** The prototype of system management model.

The server part is a central component of the system that constructs the communication network of all other components. The database management system stores the data which includes the information of the cargo's characteristics, cargo owner, cargo transporter (driver) who will carry the cargo, cargo recipient, latitude and longitude information of nodes and user information. User encompasses all roles: cargo sender, cargo receiver, and transporter. A single account can serve as a cargo sender, cargo receiver, and cargo transporter. Cargo transporters are users who take on the role of delivering cargo along their routes. There are no additional conditions or requirements to be a transporter. Users are incentivized through the system to transport cargo to designated nodes. The automatic node defines drop-off and pick-up points for the cargo shipments. The nodes communicate with the central API to access the necessary information about which cargo node box should be opened and closed at a specific time. This means that the correct cargo is delivered to the correct destination and at the right time.

Android, web and mobile parts send a request to the server by the RESTful API. Since all devices communicate through a single server, it will create a bottleneck at the port, thus the server is divided into three nodes. Server-node modules are shown in Figure 2. Requests to the server are distributed to three different nodes by the load balancer. Load balancing refers to distributing incoming network traffic across multiple servers to enhance the performance and reliability of the system. In this system, the load balancer is crucial to handling the high volume of user requests efficiently, particularly when multiple users are accessing the system simultaneously. In this way, having a load balance enhances the working performance of the application. For example, in cases of multiple user login and executing A\* algorithm in map route calculation.



**Figure 2.** Auto scaling structure of the clusters.

In this model, there is an interaction between users and cargo transporters. New users can register through the mobile application, while existing users can log in. Logged in users can add cargo and ensure that their cargo is shipped. Users can leave the cargo at the specified node after registering the cargo, this cargo is again taken by another user to the node where it needs to go, and finally, the recipient picks up the cargo from the node using the mobile application.

In the web application, users can register in the application or, if they are already registered, they can log in. Once logged in, they will have access to their active cargo information. They will be able to view details such as the origin, destination and status of the shipment. Additionally, users can view their balance and star rating within the application on their profile pages. This will give them an overview of the green coin they have earned from transporting cargo, and their reputation as a reliable and efficient transporter. Furthermore, users who will carry out cargo transportation will be able to reserve the cargoes they want to transport by the website with the developments to be made in the future. This will allow them to plan their cargo transportation schedule in advance and book cargo shipments according to their availability and preferences.

The mobile application works directly connected to the server with the API. Operations such as route calculation and shipping fee calculation are not performed in the mobile application, these operations are calculated on the server side by adding the current status to the equation and they communicate using the Restful API. During communication, if user information (login, registration, address, etc.) is to be transferred, this information is encrypted, and user passwords are kept encrypted in the database. The functions of the mobile application include creating a new user account, logging in with an existing account, and displaying the user's balance and star rate. The mobile application consists of two parts: the user module and cargo transporter module.

The user module performs the following functions:

- Adding new cargo to the system for transfer
- Ensuring the node control for leaving the cargo to be transferred to the cargo node (authorization to open and close the appropriate box of the node to be delivered)
- Having the node control authorization to track whether the cargo has been delivered and to pick up the cargo

The cargo transporter performs the following functions:

- Specifying the route to go and listing suitable cargoes
- Selecting the cargoes to be transported and getting node control authorization
- Tracking the nodes that need to be visited on the map

Automatic nodes are cargo vending machines where users deliver or pick up their cargo. They can be controlled by the mobile application. The node communicates with the server at certain intervals, and opens/closes the required box when an authorized person wants to access a box. If it notices a change in the status of the boxes through communication with the node server, it gives feedback on the LCD screen and performs the necessary operations using the servo library. The cargo node activity class diagram is shown in Figure 3.

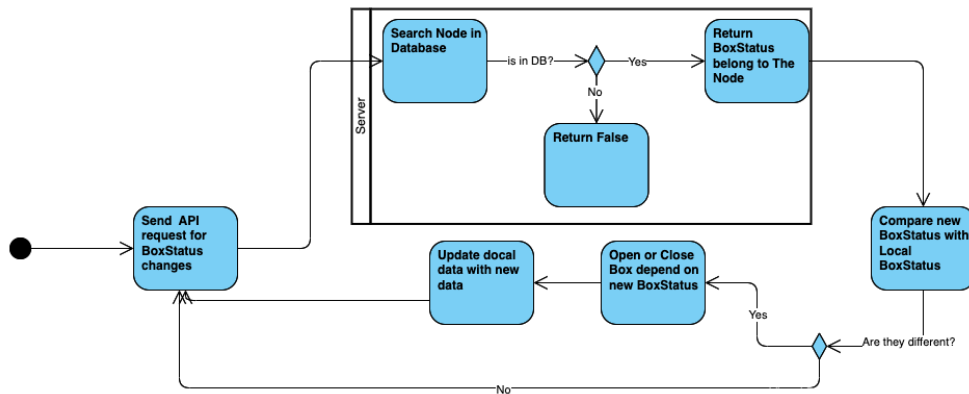


Figure 3. Authorization at the drop off and pick up nodes of the cargo.

### 4.1 Route Planing: Optimized A\* Algorithm

The A\* algorithm was optimized to filter for the extra mile and reduce workload. Even if the round trip distance between the nodes is the same, it is critical whether the driver is on the route or not. For this reason, a rewards matrix is created that also takes into account the direction, allowing for the calculation of the most appropriate route without the driver going in the opposite direction. The reward matrix is used to optimize route planning by evaluating the most profitable routes for the cargo transporters. It considers various factors such as distance and the value of the cargo. The matrix is dynamically generated before each route calculation to ensure that the optimal path is chosen for cargo transportation. The parameters of the A\* algorithm are presented in Table 1.

Table 1. The parameters of the A\* algorithm.

Parameters	Description
Source node	Initial point
Destinitation node	End point
Map	Calculates the optimum distance between two or more points given the coordinates
DB	Provides the connection with the database that holds the coordinates of the nodes and the cargo information. Gets a list of nodes and cargoes in the system before each route calculation
Base distance	The distance between source node and destination node, used as a benchmark when calculating alternative routes, stores data in kilometers
Nodes	Holds nodes to be used for route calculation
Rewards	Keeps the value of cargoes between nodes in matrix form
Gasoline price	Represents the current gasoline price
$\alpha$	Gain parameter (used as a hyperparameter when calculating the income of the cargo, a bigger value of $\alpha$ increases the value of cargoes, allowing more distant nodes to be included in the route, a smaller value of $\alpha$ is the reverse)

An example of reward matrix is shown in Table 2. The numbers in Table 2 represent the nodes, the numbers in column 1 indicate the starting point, the numbers in row 1 indicate the end point. For example, the value of cargo that will go from Node 2 to Node 3 is 22, and the value of cargo that will go from Node 3 to Node 2 is 55. As cargo values at nodes may change over time, this matrix is regenerated before the calculation. Reward matrix is created by following these steps:

- In the first step, nodes that extend the distance beyond the initially determined route by the user are pruned. This way, routes that the user technically cannot travel are not calculated, saving processing power.
- In the second step, the values of the cargoes between the remaining nodes are calculated (the calculation formula can be found in the article). This calculation is basically created by subtracting the costs of the additional distance added to the route from the earned fee. At this point, the results can be normalized by adding an extra control variable. During the calculation, the nodes are visited sequentially, and the cargo values between all the nodes that remain after the pruning process are calculated.

- In the third step, the most efficient route is calculated using the A\* algorithm and the reward matrix, and then presented to the user.

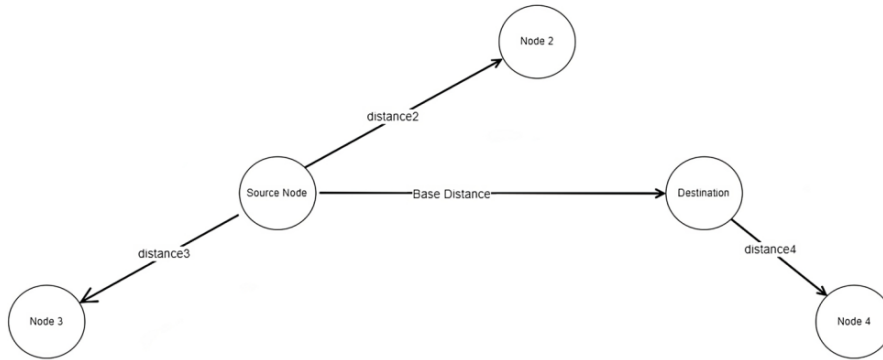
**Table 2.** An example of the reward matrix.

Node	1	2	3	4
1	-	20	50	-
2	-	-	22	90
3	30	55	-	-
4	-	20	36	-

The algorithm running process is described below.

- Base distance is calculated using the source node and destination node information provided by the user. Base distance refers to the benchmark distance between the source and destination nodes in the route planning process. It is used to filter out nodes that are too far away to be included in the optimal route, reducing unnecessary calculations.
- All up-to-date node information is pulled from the database.
- Nodes that are farther from the source node or destination node than the base distance are excluded from participating in the route calculation, thus preventing the algorithm from performing unnecessary calculations for nodes that are unreasonably far away to go.

An example of calculation model of the route planning is shown in Figure 4.



**Figure 4.** An example model of the cargo transportation between nodes from source point to destination point.

If the base distance is greater than distance 2 and distance 4 and if it is less than distance 3, node 3 is eliminated without being included in the reward matrix. It is navigated through the remaining nodes, and Equation 1 is applied during this navigation.

$$val = rewards(current\ nodes) - (|base\ distance - distance\ between\ current\ nodes|) \times gasolinePrise \times \alpha \quad (1)$$

If  $val > 0$ , it indicates that it will be profitable to go to the node and the node is added to the route list. After the navigation process is completed, the cargoes are retrieved from the database for the nodes in the route list. During this process, any cargo that can be found in intermediate nodes is checked. The result for the route and cargo calculated by A\* algorithm is as shown Equation 2 and 3.

$$routes = [Source\ node; Node2; Node4; Destination\ node] \quad (2)$$

$$cargoes = [Source\ node\ to\ Node2; Source\ node\ to\ Node4; Source\ node\ to\ Destination\ node; Node2\ to\ Node4; Node2\ to\ Destination\ node; Node4\ to\ Destination\ node] \quad (3)$$

In this way, maximum efficiency is obtained for each node visited. This process can be optimized. The algorithm can be run recursively as intermediate nodes, Source and Destination. For example: Since Node 2 and Node 4 will be visited already, Node 2 and Node 4 can be given as Source and Destination Node and the algorithm can be run again. In this case, by changing the value, the number of nodes can be prevented from increasing too much in each recursion.

The definitions in the algorithm for an example scenario are given below.

- User A (UA): Cargo Sender
- User B (UB): Cargo carrier
- User C (UC): Cargo Receiver
- Server (SV): Backend application designed to communicate with mobile applications via Rest API, implemented as a Docker container, scalable with Kubernetes
- Node A: Node where User A drops off the cargo
- Node B: Node where User B stops to pick up additional cargo
- Node C: Node where User C receives the cargo

The algorithm steps for an example scenario are shown in Table 3.

**Table 3.** The algorithm steps of the model for an example scenario.

UA Step 1: User A registers the cargo in the system. During the registration process, details such as dimensions, weight, type of cargo, and the delivery node are requested.
SV Step 2: The server calculates the value of the cargo based on the provided details and grants User A access to Node A.
UA Step 3: User A uses the mobile application to place the registered cargo into Node A.
SV Step 4: The cargo placed in Node A becomes visible to Cargo Carriers.
UB Step 5: User B selects the start (Node A) and end (Node C) points on the map via the mobile application.
SV Step 6: The server lists the cargos going from Node A to Node C and calculates the reward.
SV Step 7: The server calculates alternative routes for User B: <ul style="list-style-type: none"> <li>- First, it filters based on the total distance the user will travel, which allows interaction with nodes close to and along the user's likely route.</li> <li>- Then, it creates a Reward Matrix using the distances between nodes and the values of the cargos within them.</li> <li>- The Reward Matrix is processed with the A* algorithm to generate the most profitable alternative route for User B (In this scenario, it determines that stopping at Node B to pick up cargo and delivering it to Node C is more profitable).</li> </ul>
UB Step 8: User B selects the alternative route that includes Node B.
SV Step 9: The server grants User B authorization to pick up cargo from Node A and Node B.
UB Step 10: User B uses the mobile application authorization to pick up the first cargo from Node A.
UB Step 11: User B uses the mobile application authorization to pick up the second cargo from Node B.
SV Step 12: The server grants User B access to Node C to deliver the cargos.
UB Step 13: User B uses the mobile application authorization to deliver the cargos to Node C.
SV Step 14: The server sends notifications via the mobile application to the necessary users to collect their cargos and grants authorization for Node C.
SV Step 15: The server transfers the earned reward to User B.

In route planning, the extra distance to be traveled is used as a parameter rather than direction. If the additional distance is beneficial for the user, it is added to the route. For a node in the opposite direction, the extra distance will be traveled both to and from, which will decrease its value in the reward matrix. Therefore, it is unlikely that a route in the opposite direction will be presented to the user. However, an additional parameter can be used to further reduce the cargo value if the cargo is in the opposite direction.

Alternative routes specified for the cargo nodes between the source and destination nodes in the application shown in Figure 5 are also displayed to the user on the map.

The nodes indicated in the application in Figure 5 are the districts of Izmir in the Aegean region of Türkiye. The application runs with real data.

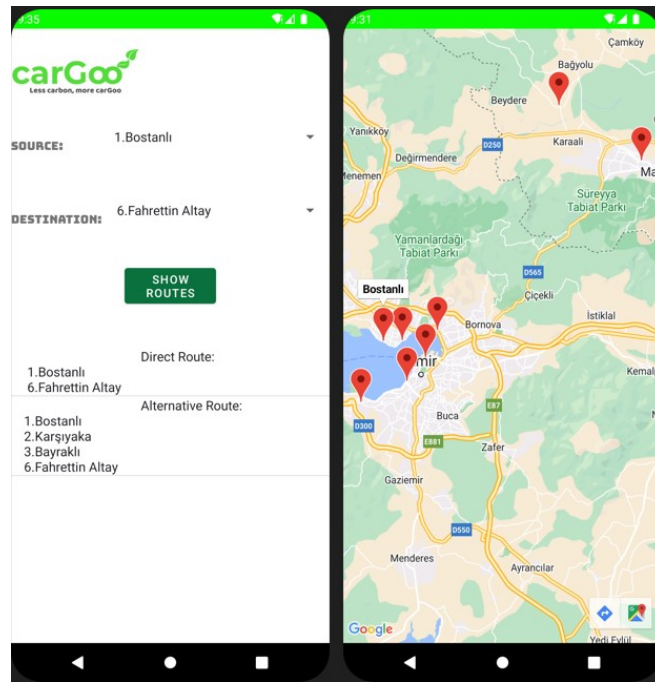


Figure 5. The route planning listed by the algorithm on the web application.

#### 4.2 Characteristics of System

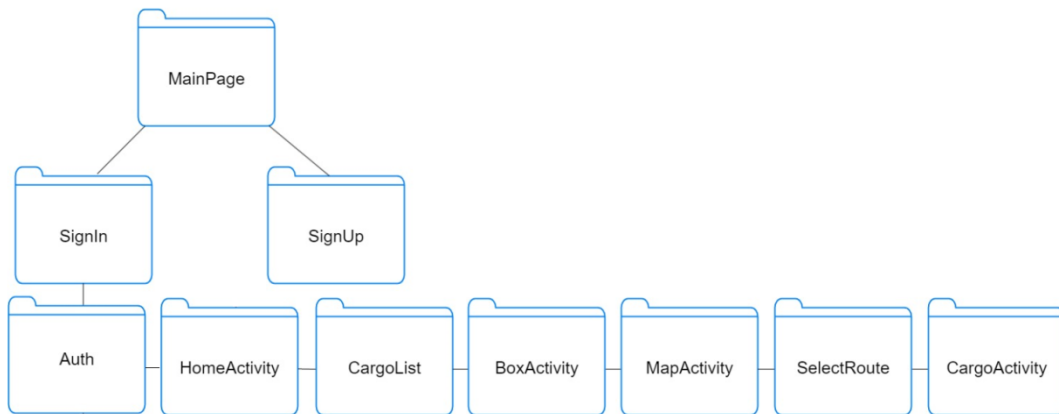
Three important interrelated agents are identified in the model. These agents and the system characteristics are given in Table 4.

Table 4. The parameters of the system model.

Agents	User/Cargo transporter	Cargo	Node
Agents' attributes	id national id mail password name lastname phone balance star	id type weight volume	id name latitude longitude
Events	sign in/sign up to the system	reception/delivery	node box open/close
Activity	login submission of new cargo taking the cargo selection of the route map activity listing the cargo	transferring	access
System's state	the number of the user max. optimum route	the number of cargo map information	the number of the node

As indicated in Table 4, the diagram of the user activities are given below.



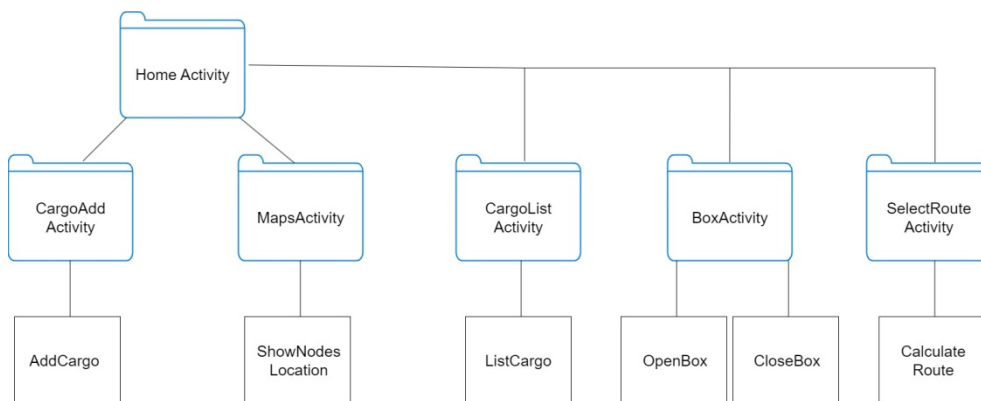


**Figure 6.** The diagram of user management model.

In Figure 6, the actions to be performed by the user are defined in the user class by entering the user properties into the system. After the user saves his one-time user information, he can log in or update the system with his user id and password. After the user enters the cargo information (receiver information, the cargo type, the cargo size, the cargo delivery-destination node, etc.) on the mobile application, the cargo is introduced to the system. When the user leaves the cargo to the node box, it enables the node box to be opened over the cargo registered in the system. After leaving the cargo in the box, the node cover is closed. Figure 7 shows the relationship between the cargo and the node in the cargo transfer process by API.

After the user delivers his cargo to the node box, the cargo will start to be listed in the driver section of the system. Another user (cargo transporter-driver) in the system can list the cargoes on the route to be taken from this driver section. The A\* algorithm can show the user new routes over the cargo nodes between the source node and destination node. By using these routes, the user can earn from cargo transfer. The user's earnings in cargo transfer are represented by the star index. The star index is a performance evaluation metric for users acting as cargo transporters. It reflects the efficiency and reliability of the transporter, with higher star ratings indicating better performance in terms of timely and safe deliveries. For example, the delivery of the cargo before the time predicted by the A\* algorithm increases the star index.

The user defined as the driver in the cargo transfer delivers the cargo on his route to the cargo node boxes at the destination. The cargo recipient can receive his cargo from the node box with his user id and node id in the system.



**Figure 7.** The diagram of cargo transferring management model.

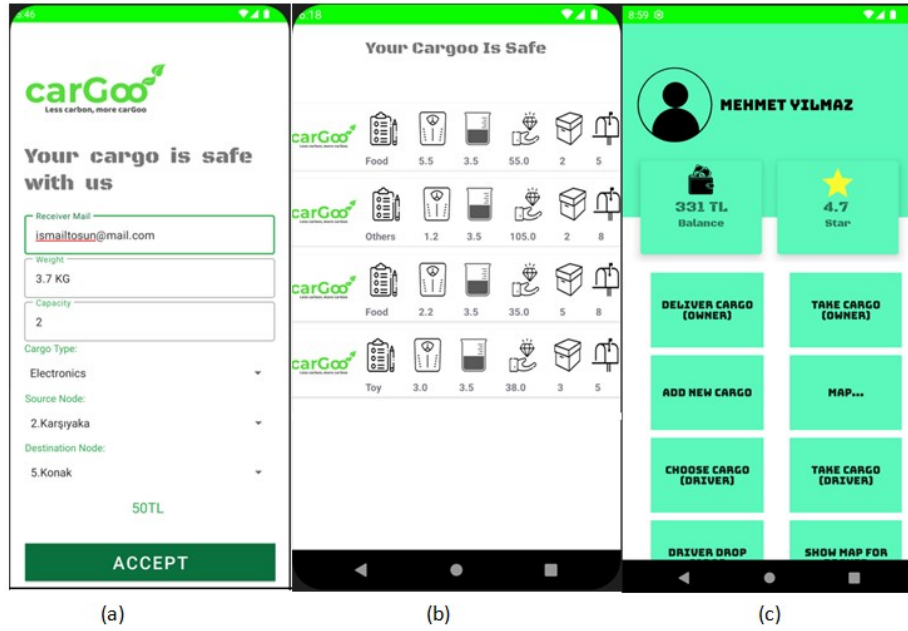
All activities indicated in Figure 7 can be carried out easily by mobile. Mobile, web and node parts cannot access the database directly. The database management system works by sending a request to the server by API that runs this system.

Parameters of the mobile application are indicated in the table below.

**Table 5.** The description of cargo parameters on the mobile application.

Parameter	Description
Receiver mail	The user defines the e-mail address of the recipient side, cargo information is transmitted via this e-mail.
Cargo weight	The cargo weight information is defined
Cargo capacity	The physical volume information of the cargo.
Cargo type	The category of cargo (for example, electronics, food, toys, medicine, clothes, etc.)
Source node	The point of shipment
Destination node	The destination of the cargo
User index (star)	The confidence index of cargo transport users

After defining the user and the cargo information, the cargo delivery process begins. The cargo parameters on the mobile application are shown in the Figure 8a below. In Figure 8b, the cargoes submitted by the user are listed. This list includes cargo type, cargo size and volume, cargo delivery point, and cargo destination information. Figure 8c shows a user's operation panel. The user can add a new cargo, list the cargoes on his route, and start the cargo transportation (driver) operations through this panel. The user can earn the green coin from cargo transportation, and can increase the star index according to the transportation performance. The higher the star index of a user, the safer and faster transportation service it provides.

**Figure 8.** The mobile interface of the model **a)** Cargo information panel, **b)** Cargo properties, **c)** The user interface.

## 5. Discussion and Conclusions

This study presents a management model that will contribute to cargo transportation in the transportation sector. Intelligent route planning proposed in this model provides optimum savings in terms of time and energy. Considering the impact of cargo transportation on environmental factors, an eco-friendly model is proposed to reduce the cost of environmental damage. An interactive user-driver model emerges with the easy management model offered to users. Automatic nodes, which form an important part of the proposed model, provide delivery and receiving service nodes of the cargo. These nodes are managed from the mobile interface with the user encryption system, which is controlled the user's authority and cannot be accessed by other users.

The advantages of this study are as follows; 1) it is an economical transportation system management model where users will make a profit, 2) an effective route is planned through the system model with the A\* algorithm, 3) in case of any server loss, the system continues to operate without being affected. Because there are load balancers on more than one server against server infrastructure problems, 4) the node infrastructure can be reproduced, 5) it is packaged and distributed using Docker containers to accommodate possible different

hardware infrastructures in the future, 6) it includes users in the system. They have a role of cargo carrier, 7) it provides a reference model for smart logistics systems.

The disadvantages of this study are as follows; 1) Learning Curve: initial learning curve associated with adapting to a new cargo transportation system. Users may need time to understand how the system operates, including managing routes, tracking deliveries, and navigating the mobile or web interface. 2) Time Management: for users acting as cargo transporters, balancing their personal travel plans with cargo deliveries could pose a challenge. If the timing and routes of deliveries are not aligned with users' own schedules, this may create inconvenience, reducing the system's appeal. Managing multiple deliveries simultaneously could also be overwhelming for some users. 3) Increased Responsibility: taking on the role of a cargo transporter adds an extra layer of responsibility for users. They must ensure the safe and timely delivery of the cargo. The potential risk of damage or loss of cargo could discourage participation. 4) Infrastructure Limitations: users in areas with poor infrastructure, such as limited GPS coverage or unreliable mobile networks, may experience difficulties using the application efficiently. This could result in inaccurate route tracking or delays in delivery updates, impacting user experience and satisfaction. 5) Legal and Safety Concerns: users might face legal concerns, such as liability for damaged or lost cargo. Without clear guidelines or insurance policies, users may hesitate to participate due to potential risks. Additionally, safety concerns during the pick-up and drop-off process, particularly in unfamiliar locations, might discourage user engagement.

While the proposed model offers significant benefits in terms of energy savings and route optimization, it has some limitations. The model depends on user participation, which may lead to inconsistent performance if user engagement is low. Additionally, the model assumes a robust urban infrastructure, limiting its applicability in rural or underdeveloped areas. The system also lacks provisions for handling specialized cargo types, such as hazardous materials, which would require additional safety and regulatory measures. This model has an abstract framework. It can be adapted and scaled to various regions, and run more complex cargo operations. However, it would require additional considerations, including infrastructure, legal regulations, and operational complexities. It may be necessary to invest in local partnerships in regions where infrastructure is lacking. When scaling to new regions, the model would need to comply with local laws, including cargo insurance requirements, liability policies, and environmental regulations.

Proposed solutions and preventive measures for improving the system can be evaluated as follows; 1) User-Friendly Interface and Training: to minimize the learning curve, the application should feature an intuitive and user-friendly interface. Additionally, onboarding tutorials, instructional videos, and customer support services can help users quickly understand the system. Providing ongoing support will ensure users feel confident in using the platform. 2) Flexible Scheduling and Route Optimization: to address time management concerns, the system can allow users to select deliveries that fit within their existing travel plans. Additionally, incorporating flexible scheduling and route optimization based on user preferences will make it easier for users to balance personal and cargo-related tasks. 3) Cargo Insurance and Safety Measures: offering cargo insurance and clear guidelines for handling cargo can reduce the burden of responsibility on users. By implementing digital verification processes for cargo pick-up and drop-off, such as barcode scanning or signature verification, the system can ensure accountability and security, thus easing users' concerns. The risk of unauthorized access can be significantly reduced by implementing two-factor authentication (a verification code sent to the user's mobile device). 4) Offline Mode and Infrastructure Investment: in areas with poor infrastructure, the application could include an offline mode that allows users to continue using the system without a strong internet connection. Once connectivity is restored, the system can sync data automatically. Additionally, investing in partnerships with local infrastructure providers could improve GPS accuracy and network reliability. 5) Clear Legal Guidelines and User Safety: providing clear legal guidelines, such as terms of liability and comprehensive insurance policies, will help address users' legal concerns. Offering safety tips for handling deliveries and ensuring secure pick-up and drop-off points can also encourage users to feel safe and comfortable using the system.

Sustainable transportation can be achieved within the scope of the following strategic issues emphasized by this study; using electric and low carbon footprint tool, efficient routes and loading planning, packaging and waste management, safety and insurance [39-42]. This study also highlights operational challenges and obligations: (a) renewing the vehicle fleet as much as possible with electric or low carbon footprint vehicles in order to minimize the emission of environmentally damaging greenhouse gases, (b) minimizing fuel consumption by using optimized routes, (c) using high-capacity transport methods and intelligent loading planning, (d) encourage customers to prefer their cargo packaging materials with sustainable and recyclable materials, (e) taking the necessary security measures for the safety of the transported cargo, and (f) gain the trust of the customers by providing appropriate insurance policies.

In real-world implementation, the usability of this model depends largely on the suitability of urban infrastructure and the availability of technical support. For the system to be successfully adopted, cities need to

have a widespread mobile communication infrastructure and GPS-supported systems. Additionally, there must be a sufficient number of users. The system should be backed by user-friendly interfaces to ensure that users can easily manage their cargo and routes. In the future, integrating the system with green technologies, such as electric vehicles will further enhance the environmental sustainability.

The widespread use of electric and hybrid vehicle technology allows parameter tuning in the route planning algorithm proposed in this study. Defining the cargo type information on the application provides a classification label for the recycling of cargo packages. Also, defining cargo size information on the application can create a data set for load planning and utilization capacities of the node boxes. The model has the potential to run dynamically when infrastructure is provided in local areas. It is important to develop such application models to promote the desired transition towards more sustainable energy sources in the logistics and transportation sector.

This study is recommended that the model be tested with different parameters. Specifically, the impact of factors such as the size and diversity of the dataset, as well as real-world user scenarios, could be evaluated. Additionally, states such as processing volume, changes in the number of users, and the system's performance under different network conditions should be taken into account to enable a more comprehensive analysis of the results. Such extended analyses would provide a clearer understanding of the model's effectiveness in real-world applications. In future works, a global-scale application with a wider logistics network can be considered by strengthening the infrastructure of this model. Expanding the model to accommodate different types of cargo and regions with varying infrastructure will be critical for scalability. Integrating advanced technologies, such as machine learning for predictive analytics and electric vehicles for greener logistics, could enhance the model's performance. Furthermore, conducting real-world pilot tests will provide insights into practical challenges and help refine the system for broader adoption. A comprehensive financial analysis for this system can assume that including development expenses for software, infrastructure setup (servers, data storage), and integration of GPS and mobile technologies, and hardware costs (mobile devices, sensors).

## References

- [1] Smirnov SA, Smirnova OY. Magnetic Levitation Cargo Ransport Role in World Economy, *Transportation Systems and Technology*, 2019; 5(2), 106-117.
- [2] Prokofieva E. Review of research in cargo transportation reliability, *E3S Web of Conferences*, 157, 05008, 2022,
- [3] Amiri-Khorreh M, Moisiadis F, Davarzani H. Socio-environmental performance of transportation systems, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2015; 26, 826-851.
- [4] Schodl R Eitler S, Ennsner B, Breinbauer A, Hu B, Markvica K, Prandtstetter M, Zajicek J, Berger T, Pfoser S, Berkowitsch C, Hauger G. Innovative means of cargo transport: A scalable method for estimating regional impacts, *Transportation Research Procedia*, 2018; 30, 342-349.
- [5] Rodrigue JP. *Transportation and Energy (Chapter 4). The Geography of Transport Systems*, 5th ed., 2020.
- [6] Oubnaki H, Haouraji, C, Mounir, B, Mounir, I, Farchi, A. Energy Consumption in the Transport Sector: Trends and Forecast Estimates in Morocco. *E3S Web of Conferences* 336, 00078, 2022.
- [7] Juan AA, Mendez CA, Faulin J, Armas J, Grasman SE. Electric Vehicles in Logistics and Transportation: A Survey on Emerging Environmental, Strategic, and Operational Challenges. *Energies*, 2016; 9(2), 86,
- [8] Speranza MG. Trends in transportation and logistics, *European Journal of Operational Research*, 2016; 264(3), 830-836.
- [9] Figliozzi M. Vehicle routing problem for emissions minimization, *Transportation Research Record* 2010; 2197(1), 1–7.
- [10] Berechman J. Urban and regional economic impacts of transportation investment: a critical assessment and proposed methodology. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1994, 28(4), 351-362.
- [11] Zubkov V, Sirina N. Improvement of Cargo Transportation Technology in Rail and Sea Traffic. In: Popovic, Z., Manakov, A., Breskich, V. (eds) *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia*, 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1116. Springer, Cham.
- [12] Kern J. *The Digital Transformation of Logistics: Demystifying Impacts of the Fourth Industrial Revolution, A Review About Technologies and Their Implementation Status (Chapter 25)*, 2021.
- [13] Ivanov D, Dolgui A, Sokolov B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Journals, 2019; 57(3), 829-846.
- [14] Gesing B, Peterson SJ, Michelsen D. *Artificial Intelligence in Logistics*, DHL Customer Solutions & Innovation, 2018, DHL CSI, 53844 Troisdorf, Germany.
- [15] Soltani ZK. The applications of artificial intelligence in logistics and supply chain, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 2021; 12(13), 4488–4499.
- [16] Adigüzel S. Use of artificial intelligence in logistics management, *Proceedings of the 1st International Conference on Interdisciplinary Applications of Artificial Intelligence*, 2021, pp. 17– 25.
- [17] Boute RN, Udenio M. *Ai in logistics and supply chain management*, 2021.
- [18] Toorajipour R, Sohrabpour V, Nazarpour A, Oghazi P, Fischl M. Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review, *Journal of Business Research*, 2021; 122, 502–517.
- [19] Sinha K, Labi S. *Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming*. JohnWiley & Sons, New Jersey, NY, USA, 2007.

- [20] Grimm N, Faeth S, Golubiewski N, Redman C, Wu J, Bai X Briggs, J. Global change and the ecology of cities, *Science*, 2008; 319(5864), 756–760.
- [21] Schliwa G, Armitage R, Aziz S, Evans J, Rhoades J. Sustainable city logistics — making cargo cycles viable for urban freight transport, *Research in Transportation Business & Management*, 2015; 15, 50–57.
- [22] Nüesch T, Cerofolini A, Mancini G, Cavina N, Onder C, Guzzella L. Equivalent consumption minimization strategy for the control of real driving nox emissions of a diesel hybrid electric vehicle, *Energies*, 2014; 7(5), 3148–3178.
- [23] Colin G, Chamailard Y, Charlet A, Nelson-Gruel D. Towards a friendly energy management strategy for hybrid electric vehicles with respect to pollution, battery and drivability, *Energies*, 2014; 7(9), 6013–6030.
- [24] Chen Z, Xiong R, Wang K, Jiao B. Optimal energy management strategy of a plug-in hybrid electric vehicle based on a particle swarm optimization algorithm, *Energies*, 2015; 8(5), 3661–3678.
- [25] Hwang T, Ouyang Y. Urban freight truck routing under stochastic congestion and emission considerations, *Sustainability*, 2015; 7(6), 6610–6625.
- [26] Bektas T, Laporte, G. The pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011; 45(8), 1232–1250.
- [27] Min H. Artificial intelligence in supply chain management: theory and applications, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2010; 13(1), 13–39.
- [28] Karur K, Sharma N, Dharmatti C, Siegel JE. A survey of path planning algorithms for mobile robots, *Vehicles*, 2021; 3(3), 448–468.
- [29] Dilmevani C. Top 15 use cases and applications of ai in logistics. <https://research.aimultiple.com/logistics-ai/> Accessed 19 August 2023.
- [30] McKinnon AC. Preparing Logistics for the Low-Carbon Economy. In: Merkert, R., Hoberg, K. (eds) *Global Logistics and Supply Chain Strategies for the 2020s*. Springer, 2023.
- [31] Altunsoy U. An investigation on the use of electric vehicles in the cargo transport system, *International Anatolia Academic Online Journal Sciences Journal*, 2021; 7(2), 1–14.
- [32] Nathanail E, Papoutsis K. Towards a Sustainable Urban Freight Transport and Urban Distribution, *Journal of Traffic and Logistics Engineering* 2013; 1(1), 58-63.
- [33] Arif SM, Lie TT, Seet BC, Ayyadi S, Jensen K. Review of Electric Vehicle Technologies, Charging Methods, Standards and Optimization Techniques. *Electronics*, 2021; 10(16):1910.
- [34] Aydın GT, Ögüt KS. Logistic villages in Europe and Turkey, *Proceedings of the 2nd International Railway Symposium*, 2008, pp. 1471–1481.
- [35] Amazon Flex. Website <https://flex.amazon.com/> Accessed 18 September 2024.
- [36] Uber Freight. Website <https://www.uberfreight.com/> Accessed 18 September 2024.
- [37] CargoX. Website <https://cargox.io/> Accessed 18 September 2024.
- [38] Convoy. Website <https://convoy.com/> Accessed 18 September 2024.
- [39] Kaplanseren B, Mercan B, Özdemir B., Kadioğlu HH, Sel C. Carbon footprint in vehicle routing and an industrial application, *International Journal of Engineering Research and Development*, 2019; 11(1), 239–252.
- [40] McBain B, Lenzen M, Albrecht G, Wackernagel M. Reducing the ecological footprint of urban cars, *International Journal of Sustainable Transportation*, 2018; 12(2), 117–127.
- [41] Kumar A, Anbanandam R. Development of social sustainability index for freight transportation system, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210, 77–92.
- [42] Chi G, Stone B. Sustainable transport planning: Estimating the ecological footprint of vehicle travel in future years, *Journal of Urban Planning and Development*, 2005; 131(3), 170–180.

## Customer Segmentation by using Annual E-Invoice Data

Fahrettin Burak DEMİR<sup>1\*</sup>, Gürkan ÇELİK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Software Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Türkiye

<sup>2</sup> F.I.T. Information Technology Systems Services Industry and Com. Inc., Istanbul, Türkiye

\*1 fdemir@bandirma.edu.tr, 2 gurkan.celik@sovos.com

(Geliş/Received: 25/12/2023;

Kabul/Accepted: 27/09/2024)

**Abstract:** As businesses navigate the digital landscape, the proliferation of electronic transactions has led to an abundance of valuable data that can be harnessed for strategic decision-making. This study explores the application of CRM and RFM analysis for customer profiling and segmentation, utilizing e-invoice data as a rich source of information. By leveraging these advanced statistical techniques, the research aims to uncover hidden patterns within electronic transaction records, allowing for the identification of distinct customer segments based on their purchasing behavior. The methodology involved collecting and pre-processing one year of e-invoice data from Fit IT Company, followed by applying statistical models to uncover underlying structures and relationships. Furthermore, the research examines the implications of customer segmentation on marketing strategies, customer relationship management, and personalized service offerings. CRM and RFM analyses were performed on the annual sales data obtained as a result of e-invoice usage service to customers. When the results of the analysis were analyzed, the number of transactions belonging to the sender, recipient, and parties in the top 10 every month were extracted. It has been demonstrated that customer segmentation can be conducted more comprehensively by using CRM and RFM analyses together. While CRM analysis focuses on transaction volume and customer relationships, RFM analysis provides a more detailed perspective on customer behavior by evaluating purchase frequency, recency, and monetary value. In the study, by analyzing e-invoice data through these two methods, the most valuable customer groups were identified, and how strategic marketing approaches can be developed for these groups was illustrated. The combined use of CRM and RFM analyses allows for more accurate customer segmentation based on both transaction volume and spending habits. This approach concludes that strategies can be developed to increase customer loyalty, optimize marketing strategies, and improve business performance.

**Key words:** CRM Analyses, Customer Segmentation, Digital Business, e-Invoice, RFM Analyses.

### Yıllık E-Fatura Verilerini Kullanarak Müşteri Segmentasyonu

**Öz:** İşletmeler, dijital alanda gezinirken, elektronik işlemlerin yaygınlaşması stratejik karar alma için kullanılacak çok sayıda değerli veriye yol açmıştır. Bu çalışma, e-fatura verilerini zengin bir bilgi kaynağı olarak kullanarak müşteri profili ve segmentasyonu için CRM ve RFM analizinin uygulanmasını araştırmaktadır. Bu gelişmiş istatistiksel tekniklerden yararlanarak, elektronik işlem kayıtlarındaki gizli kalıpları ortaya çıkarmayı ve satın alma davranışlarına göre farklı müşteri segmentlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Metodoloji, Fit IT Company'den bir yıllık e-fatura verisinin toplanmasını ve ön işlenmesini, ardından altta yatan yapıları ve ilişkileri ortaya çıkarmak için istatistiksel modeller uygulanmasını içermektedir. Ayrıca çalışma, müşteri segmentasyonunun pazarlama stratejileri, müşteri ilişkileri yönetimi ve kişiselleştirilmiş hizmet teklifleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. CRM ve RFM analizleri, müşterilere e-fatura kullanım hizmeti sonucunda elde edilen yıllık satış verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, her ay ilk 10'da yer alan gönderici, alıcı ve taraflara ait işlem sayısı çıkarılmıştır. CRM ve RFM analizlerinin birlikte kullanılmasıyla müşteri segmentasyonunun daha kapsamlı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir. CRM analizi işlem hacmi ve müşteri ilişkilerine odaklanırken, RFM analizi satın alma sıklığı, yakınlık ve parasal değeri değerlendirerek müşteri davranışı hakkında daha detaylı bir bakış açısı sunmaktadır. Çalışmada, e-fatura verilerinin bu iki yöntemle analiz edilmesiyle en değerli müşteri grupları belirlenmiş ve bu gruplara yönelik stratejik pazarlama yaklaşımlarının nasıl geliştirilebileceği gösterilmiştir. CRM ve RFM analizlerinin birlikte kullanılması, hem işlem hacmi hem de harcama alışkanlıklarına göre daha doğru müşteri segmentasyonuna olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, müşteri sadakatini artırmak, pazarlama stratejilerini optimize etmek ve iş performansını iyileştirmek için stratejiler geliştirilebileceği sonucuna varmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** CRM Analizleri, Müşteri Segmentasyonu, Dijital İşletme, e-Fatura, RFM Analizleri.

### 1. Introduction

In the era of digital transformation, businesses are not only witnessing a surge in electronic transactions but are also presented with unprecedented opportunities to harness the wealth of data generated through these transactions. One such avenue that holds immense potential for strategic insights is the realm of e-invoice data. As

\* Sorumlu yazar: [fdemir@bandirma.edu.tr](mailto:fdemir@bandirma.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9095-5166, <sup>2</sup> 0009-0005-5282-8365

companies increasingly transition towards electronic invoicing systems, they find themselves in possession of a vast repository of information that extends far beyond mere financial transactions. Traditionally, customer segmentation has been a cornerstone of effective marketing and business strategies, allowing organizations to tailor their approaches based on the unique characteristics and preferences of different customer groups. The integration of e-invoice data into this segmentation process represents a paradigm shift, as it introduces a granular perspective into customer behavior, transcending conventional demographic or psychographic parameters. By adopting advanced statistical methods and machine learning algorithms, businesses can uncover hidden patterns within the intricate web of electronic transactions, leading to the identification of nuanced customer segments.

In the contemporary business landscape, where electronic transactions have become ubiquitous, the utilization of e-invoice data for customer segmentation emerges as a cutting-edge strategy. Electronic invoicing not only streamlines financial transactions but also generates a wealth of valuable information that extends beyond monetary exchanges. Customer segmentation, a fundamental aspect of targeted marketing and personalized service delivery, gains a new dimension when augmented by the intricate details embedded within e-invoice data. Unlike traditional segmentation methods reliant on demographic or psychographic factors, leveraging e-invoice data allows for a more nuanced and dynamic approach. Through the application of advanced statistical techniques and machine learning algorithms, businesses can delve into the intricacies of customer behavior, identifying patterns, preferences, and trends that might remain obscured through conventional means. Transaction frequency, monetary values, product categories, and temporal patterns all contribute to the rich tapestry of e-invoice data, enabling the creation of finely tuned customer segments. This approach not only enhances the precision of marketing efforts but also facilitates a more tailored and responsive customer experience. However, the integration of e-invoice data into the segmentation process comes with its set of challenges, including data privacy concerns and the need for robust analytical frameworks. Despite these challenges, the potential benefits are significant—businesses can gain a competitive edge by delivering targeted promotions, personalized services, and strategic communication to specific customer segments, thereby fostering customer loyalty and maximizing the value of each customer relationship. As organizations strive to adapt to the digital age, the exploration of customer segmentation through e-invoice data stands as a pivotal strategy for navigating the complexities of the modern marketplace. This paper delves into the realm of customer segmentation, exploring the innovative application of anonymous e-invoice data as a tool to discern and understand distinct customer profiles.

## 2. Related Works

There are a significant number of studies on customer segmentation in the literature. Customer segmentation has generally been achieved through approaches such as statistical analysis, clustering and machine learning. It seems possible to make commercial activities more systematic by segmenting customers, promotions, campaigns, discount rate determination, special discounts, etc.

Marcus [1] aims to present an uncomplicated yet potent method for customer segmentation known as the Customer Value Matrix. The strength of this approach is not only in its ability to pinpoint crucial customer segments but also in its capacity to spotlight appropriate marketing strategies and tactics that can be easily conveyed and implemented. Jonker et al. [2] introduce a unified optimization method that tackles two primary concerns: grouping customers into uniform segments, and identifying the most effective strategy for each segment. They apply this integrated optimization framework within the context of a direct-mail scenario for a charitable organization. Kim et al. [3] suggest a structure for assessing customer worth and categorizing customers according to their value. Following the segmentation of customers based on their value, it has been demonstrated the development of strategies tailored to each customer segment through a case study centered around a wireless telecommunication company. It has investigated the contemporary developments in customer lifetime value and models for customer segmentation, pinpointing critical areas for prospective research [4]. The segmentation model based on customer lifetime value, known as CLV-based segmentation, involves categorizing customers into meaningful segments primarily based on their customer lifetime value and, possibly, other contributing factors. The potential of customer segmentation is virtually boundless, serving as a tool to steer companies towards more efficient marketing approaches and the development of novel products [5]. In this conceptual overview, it has been explored the case of Migros Turk, an innovative multinational firm, to analyze the successful formulation of a set of segmentation strategies. Chan [6] introduces an innovative methodology that integrates customer targeting and segmentation for campaign strategies. The study employs a recency, frequency, and monetary (RFM) model to discern customer behavior and utilizes a customer lifetime value (LTV) model to assess the identified segmented customers. The application of a genetic algorithm (GA) to optimize the selection of more suitable customers has been also suggested. Namwar [7] utilizes data mining tools to develop a fresh customer segmentation approach incorporating RFM, demographic, and LTV data. The novel method comprises two phases. Initially, K-means clustering is employed to group customers into distinct segments based on their RFM characteristics.

Subsequently, utilizing demographic data, each cluster undergoes further partitioning into new clusters. Ultimately, a customer profile is crafted based on LTV analysis. Insights gained from customer segmentation empower company leaders to foster strong customer relationships and tailor their marketing strategies to align with customer expectations [8]. To attain the most effective segmentation, it has been devised a soft clustering technique employing a latent mixed-class membership clustering approach. This method categorizes online customers based on their purchasing data across various categories. Soft computing, categorized among data mining methods, has recently found application in the realm of segmentation, showing promise as an influential area for future segmentation research [9]. He scrutinizes the current uses of soft computing techniques in tackling segmentation challenges, emphasizing crucial factors, particularly those linked to segmentation effectiveness, that warrant consideration in every segmentation study. Many customer segmentation methods that rely on customer value often neglect to consider the element of time and the evolving trends in value changes during their analysis. It has been categorized customers according to their value using the RFM model and the K-means clustering method [10]. Subsequently, an evaluation of changes over multiple periods is conducted. It is claimed that its integration of time and the trend of customer value changes enhances the precision of predictions based on customers' past behavior. It explored two distinct data mining methodologies for customer segmentation: clustering and subgroup discovery [11]. The resultant models yielded six market segments and 49 rules, providing enhanced insights into customer preferences within the context of a highly specialized fashion manufacturer/e-tailor in a customized manner. This is where the application of machine learning becomes crucial, utilizing various algorithms to unveil concealed patterns in data for improved decision-making in the future [12]. The somewhat elusive concept of determining which segment to target is clarified through segmentation. Customer segmentation involves grouping customers with similar behaviors into the same segment and distinguishing those with different patterns into separate segments.

This study introduces an innovative approach by simultaneously employing CRM (Customer Relationship Management) [13, 14] and RFM (Recency, Frequency, Monetary Value) [14] analyses, filling a gap in the existing literature. While these two methods are typically applied independently, their combined use in this research offers a more comprehensive understanding of customer behaviors, thereby facilitating the development of more effective customer segmentation and targeting strategies. CRM analysis allows for an in-depth examination of customer relationships, while RFM analysis provides valuable insights based on customers' purchasing behaviors. The distinguishing feature of this work from others is its integration of these two powerful tools, enabling businesses to gain a more detailed understanding of their customer base and tailor their marketing and sales strategies with greater precision. This holistic approach has the potential to enhance customer loyalty, maximize customer lifetime value, and, consequently, increase business revenues. Therefore, this study significantly contributes to the literature on customer segmentation and relationship management, opening new perspectives for both academic research and practical applications.

### 3. Materials and Methods

The dataset used in the study was provided by Sovos and was obtained for the period from January 2022 to December 2022. The dataset consists of 30 attributes in total, counting the number of features in each row. The SENDER and RECIPIENT fields in each row represent the sender and recipient companies, and the STATUS and STATUS\_DESCRIPTION fields contain the status of each invoice transaction and the text describing this status. The STATUS\_DATE field indicates the date each transaction occurred, while the SCENARIO field indicates the transaction scenario. The INVOICE\_TYPE field indicates the type of invoices issued, while the DOCUMENT\_FX\_RATE field contains the exchange rate at which the invoice document was issued. ITEM\_NUMBER indicates the number of goods/service items included in each invoice transaction, while MAL\_HIZMET\_TOTAL\_AMOUNT represents the total amount of goods/services for the invoice transaction. The SEND\_DATE field indicates when each transaction was sent, while the VAT fields (VAT\_0\_Amount, VAT\_0\_MATRAH, VAT\_1\_Amount, VAT\_1\_MATRAH, VAT\_8\_Amount, VAT\_8\_MATRAH, VAT\_18\_Amount, VAT\_18\_MATRAH) contain the VAT amounts and bases broken down according to the different VAT rates in the invoice transaction. Finally, the field GONDERICI\_SEHIR indicates the city where the sender is located. The dataset contains detailed information on e-invoice transactions and can be used to understand financial movements in business activities. Table 1 presents a simple example of the dataset, showing the attributes in the dataset.



**Table 1.** Sample Dataset.

STATUS	STATUS ANNOTATION	STATUS DATE	STATUS DATE	SCENARIO	EDIT DATE	EDIT TIME	INVOICE TYPE
100	Invoice forwarded to buyer	3.16.2022	BASIC INVOICE	3.15.2022	00:01:00+0200	SATIS	TRY
100	Invoice forwarded to buyer	3.16.2022	BASIC INVOICE	3.15.2022	00:01:00+0200	SATIS	TRY
100	Invoice forwarded to buyer	3.16.2022	BASIC INVOICE	3.15.2022	00:01:00+0200	SATIS	TRY
100	Invoice forwarded to buyer	3.16.2022	BASIC INVOICE	3.15.2022	00:01:00+0200	SATIS	TRY
100	Invoice forwarded to buyer	3.16.2022	BASIC INVOICE	3.15.2022	00:01:00+0200	SATIS	TRY

CURR	TAXES EXCLUSIVE TOTAL AMOUNT	CURR	TAXES TOTAL AMOUNT	CURR	TOTAL DISCOUNT	AMOUNT	SUBMISSION DATE
TRY	36658,8	TRY	39591,5	TRY	14256,2	39591,5	59:59,4
TRY	97961,06	TRY	105797,94	TRY	62581,03	105797,94	59:59,0
TRY	294049,28	TRY	317573,22	TRY	196747,43	317573,22	59:58,9
TRY	255825,61	TRY	276291,66	TRY	168771,5	276291,66	59:58,7
TRY	238222,46	TRY	257280,26	TRY	164104,56	257280,26	59:58,5

VAT 1%	VAT 1% MATRAH	VAT 8%	VAT 8% MATRAH	VAT 18%	VAT 18% MATRAH	SHIPPER_CITY
0	0	2932,7	36658,8	0	0	İSTANBUL
0	0	7836,88	97961,06	0	0	İSTANBUL
0	0	23523,94	294049,28	0	0	İSTANBUL
0	0	20466,05	255825,61	0	0	İSTANBUL
0	0	19057,8	238222,46	0	0	İSTANBUL

### 3.1. Data Preprocessing

Before performing RFM analysis on the dataset used in the study, data preprocessing stages were performed. Data preprocessing is a critical stage used in data analytics and machine learning projects. It involves cleaning, organizing and preparing the raw dataset. Data preprocessing steps make the dataset suitable for machine learning algorithms by removing potential errors, correcting inconsistencies and organizing the data in a meaningful way. In the study, missing and outlier data were detected as part of the preprocessing step, but no missing or outlier data were found in the dataset.

#### 3.1.1. CRM Analysis

CRM (Customer Relationship Management) is a set of strategies and technologies used to effectively manage a business' customer relationships, increase customer satisfaction and optimize sales performance [15]. CRM includes the processes of collecting and analyzing customer data, managing customer interactions and improving customer relationships. This system helps a business to communicate with its customers in a more interactive and personalized way. CRM aims to improve the customer experience by creating customer-specific campaigns, responding quickly to customer requests, tracking sales opportunities and analyzing customer feedback. It also makes strategic use of customer data to increase customer loyalty, make sales processes more efficient and improve business performance. CRM is usually implemented through specialized software and enables businesses to better understand customer communications, develop customer-centric strategies and sustainably grow their customer base. Therefore, CRM is a key element in today's business world that emphasizes the importance of customer centricity and is a key element towards achieving competitive advantage. For the dataset used in the experiments, CRM analysis was performed by considering the following article [16].

### - Customer Segmentation:

By segmenting your customers according to the SENDER and RECIPIENT fields, the characteristics of certain customer groups (for example, those who frequently send invoices to a specific recipient) were evaluated.

#### 3.1.2. RFM Analysis

RFM analysis is an effective marketing analysis method used to study customer behavior. This method evaluates a customer's shopping behavior based on three basic criteria: Recency, Frequency and Monetary Value. How recently a customer has shopped, how often they shop and the amount they spend on these purchases are analyzed by measuring these criteria. Recency determines the last time a customer made a purchase and is a value that measures this. Frequency refers to the number of times a customer has shopped in a given time period. Monetary represents the total monetary value spent by the customer. RFM analysis is usually performed by normalizing these criteria. Normalization involves compressing the data into a specific range. This allows it to be transformed into a smaller and often useful range, usually [-1,1] or [0.0, 1.0]. This normalization process is performed by assigning equal weights to different attributes in the data set. This type of normalization is commonly used, especially in classification algorithms. In conclusion, RFM analysis is a powerful tool to help businesses optimize their customer segmentation and marketing strategies. Through this analysis, customers' shopping behavior can be better understood and customized strategies can be developed [15], [16].

#### 4. Experimental Evaluations

In this study, experiments on customer segmentation are carried out on the e-invoice dataset. The purpose of customer segmentation is to divide customers into groups to reflect the similarities between the receivers and senders in each group. In addition, in the experiments, it is decided how to establish a relationship with customers in each segment to maximize the value of each buyer and sender customer for the business. For the dataset used in the study, the top 10 sending and receiving companies with the highest number of transactions per month are presented in Table 2-5. The relationships between the sender and receiver are then re-analyzed according to total and average item-number and amount values, and the most significant 10 are presented in Table 6 for each month.

**Table 2.** Top 10 most valuable buyers and sellers and number of transactions in January, February and March (Winter Period).

January				February				March			
Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number
G15	3841	A4269	755	G1561	5747	A1288	1046	G1561	5753	A1288	999
G42	2973	A10561	501	G15	2965	A15102	871	G15	3985	A10561	384
G1460	1244	A1288	442	G1499	1864	A151	638	G42	2640	A32723	366
G1448	928	A6532	319	G21	1826	A4269	578	G2025	1212	A2350	313
G39	872	A15102	282	G44	1692	A345	411	G1460	1093	A151	294
G44	684	A63543	240	G1448	1561	A6532	389	G1627	970	A3051	220
G1505	598	A31578	165	G1460	1499	A16440	278	G21	824	A4476	217
G1499	502	A10445	165	G1751	1137	A384547	246	G3708	764	A3047	207
G49	499	A5745	164	G22	908	A4476	231	G1406	752	A17422	202

Table 2 provides a CRM analysis for the winter period, detailing transactions between top buyers and sellers for January, February, and March. This analysis offers insights into market dynamics, highlighting how transaction volumes and partnerships evolve in the cold season.

In January, G15 stands out with 3841 transactions, marking a significant presence in the market, with A4269 receiving the highest number of transactions at 755. This indicates a robust demand for G15's offerings and possibly a strategic focus on A4269 as a key market segment or partner. The high volume of transactions underscores the importance of understanding market needs and maintaining strong relationships with significant buyers to ensure sustained business growth.

February sees a shift with G1561 leading the transactions at 5747, directed primarily towards A1288 with 1046 transactions. This substantial increase in transactions for G1561, coupled with the focus on A1288, suggests a strategic pivot or a successful marketing initiative capturing significant market attention. G15 maintains a strong presence, although with slightly fewer transactions, indicating ongoing competitiveness and market activity.

March continues the trend with G1561 at the helm, closely mirroring February's numbers, suggesting a sustained strategic focus and possibly cementing G1561's market position. A1288 remains a principal receiver, highlighting its pivotal role in the market and potential strategic value to sellers like G1561. G15's resurgence in

transactions to 3985, primarily towards A10561, demonstrates market fluidity and the strategic shifts businesses may employ to adapt to changing market dynamics and consumer demands.

This winter period analysis underscores the fluid and dynamic nature of market transactions, emphasizing the critical role of strategic agility and adaptability. Businesses that can effectively navigate changing market conditions, identify emerging trends, and maintain strong partnerships can capitalize on opportunities for growth and consolidation. The transaction volumes and the evolving relationships between buyers and sellers not only reflect the operational strengths and market positioning of these entities but also provide a lens through which broader market trends and consumer demands can be discerned. Such insights are invaluable for businesses aiming to refine their strategic approaches, optimize their market positioning, and enhance responsiveness to the evolving marketplace.

**Table 3.** Top 10 most valuable buyers and sellers and number of transactions in April, May and June (Spring Period).

April				May				June			
Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number
G15	3249	A1288	1369	G15	3636	A6532	482	G4479	12488	A1288	1178
G42	2953	A10561	476	G42	1892	A10561	373	G5666	10455	A151	1157
G39	2487	A55036	427	G1460	750	A5745	312	G15	4826	A10561	699
G6	2049	A16440	388	G28	717	A1288	303	G42	3390	A6532	580
G44	1689	A15102	329	G169	477	A3864	87	G21	2265	A5745	309
G3708	1360	A4476	311	G1	462	A31027	67	G39	2213	A16440	262
G1448	1331	A53459	253	G1406	456	A3599	67	G1	1743	A44	258
G49	1201	A58660	236	G44	447	A7327	56	G1460	1445	A2669	250
G1460	1088	A3047	235	G45	412	A6706	50	G1448	1168	A4476	237

Table 3's CRM analysis for the spring period, spanning April, May, and June, presents a detailed overview of the transactional dynamics between the leading buyers and sellers, showcasing how market interactions evolve over these months. April sees G15 leading with 3249 transactions, signifying a strong start to the spring period, with A1288 being the primary receiver. This highlights a robust demand for G15's offerings and possibly a strategic partnership with A1288, underscoring the critical nature of understanding customer needs and preferences to maintain a competitive edge in the market.

In May, G15 continues its dominance with 3636 transactions, further establishing its market presence. The shift towards A6532 as the top receiver with 482 transactions indicates a broadening of G15's market reach or possibly diversification in its product or service offerings. This month's dynamics underscore the importance of agility and adaptation in business strategies to cater to evolving market demands.

June introduces a significant change with G4479 leading the transactions at an astonishing number of 12488, directing a majority to A1288. This dramatic increase suggests a potential market disruption or a successful promotional campaign that significantly enhanced G4479's market share. Concurrently, G5666 emerges with 10455 transactions, primarily to A151, indicating a vibrant market with active competition and strategic maneuvering among key players.

This period exemplifies the fluidity of market dynamics and the significance of strategic business decisions. The continuous presence of G15 as a significant sender across two months and the sudden emergence of G4479 and G5666 in June reflect the competitive nature of the market and the potential for businesses to rapidly ascend in transactional volume through effective marketing strategies and product offerings. The varied receivers across these months, from A1288 to A6532 and A10561, further highlight the diverse consumer base and the necessity for businesses to tailor their offerings to meet distinct customer segments.

Overall, the CRM analysis of Table 3 emphasizes the importance of leveraging transactional data to inform strategic decisions, adapt to market changes, and identify growth opportunities. Businesses must remain attuned to market trends, customer behaviors, and the competitive landscape to sustain growth and profitability in a dynamic market environment. This analysis not only sheds light on the operational capacities and strategic positioning of the entities involved but also offers insights into broader market trends and potential strategies for businesses seeking to enhance their market positioning and responsiveness to consumer demands.

**Table 4.** Top 10 most valuable buyers and sellers and number of transactions in July, August and September (Summer period).

July				August				September			
Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number
G49	3786	A6532	1012	G39	2486	A6532	1292	G15	3493	A1288	1756
G15	3053	A1288	631	G1499	1435	A1288	855	G42	2851	A6532	1046
G42	2511	A5745	559	G3708	1364	A5745	721	G6	2194	A23484	709
G21	1187	A10561	370	G3180	1322	A151	630	G1460	1664	A181888	544
G1460	986	A123961	358	G2025	1124	A15102	594	G1	1531	A5745	473
G39	920	A4269	347	G3194	1066	A16440	537	G7182	1315	A10561	471
G44	898	A151	345	G21	1028	A345	394	G1118	1286	A51444	326
G1448	741	A10445	241	G22	997	A2850	255	G7538	1277	A151	301
G1	659	A126123	195	G49	987	A162039	246	G21	1243	A4476	295

The CRM analysis of the transaction activities during the summer months of July, August, and September meticulously delineates the fluctuations in transaction volumes between prominent buyers and sellers, illustrating the dynamic structure of the market. In July, G49's position as the most active sender with 3786 transactions reflects a significant demand for its offerings, a testament to the company's strategic maneuvers or seasonal influences driving the market at that time. The consistent reception of a large volume of transactions by A6532 underscores its substantial purchasing power and pivotal role within the market dynamics, highlighting its capacity to engage in significant transactions with major sellers like G49.

Transitioning into August, G39 ascends as the leading sender with 2486 transactions, signaling a shift in market interactions and strategic positioning among the market players over time. The sustained prominence of A6532 as a receiver, coupled with the increased transactions involving A1288, points to evolving market relationships, possibly indicative of new product launches or the fulfillment of specific demands of these key market players.

September introduces another layer of dynamics with G15 taking the helm in transaction volumes, underscoring its influential market presence and operational scale. The substantial increase in transactions received by A1288, emerging as the top receiver, could signify strategic realignment or efforts to bolster partnerships with key suppliers such as G15. Additionally, the ongoing transactions to A6532 throughout these months exemplify its crucial role in the supply chain, indicating its strategic value to sellers.

This analysis derived from Table 4 emphasizes the market's fluid nature and the imperative for businesses to exhibit strategic flexibility, adapting to market shifts to cater to changing demands. The detailed transaction volumes between sellers and buyers not only reveal the operational capabilities and market standings of the entities involved but also offer insights into broader market trends and consumer demands, serving as valuable intelligence for firms aiming to refine their strategic orientations, optimize market positioning, and enhance responsiveness to market evolutions. This comprehensive view underscores the importance of leveraging transactional data to inform strategic decisions, highlighting the potential for businesses to gain a competitive edge and expand their market share by aligning more closely with customer needs and preferences.

**Table 5.** Top 10 most valuable buyers and sellers and number of transactions in October, November and December (Autumn Period).

October				November				December			
Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number	Sender	Number	Receiver	Number
G15	3615	A6532	1068	G8013	6828	A1288	993	G8013	5174	A1288	974
G42	3167	A10561	661	G15	2444	A239093	809	G42	3247	A51444	712
G1460	1828	A5745	493	G39	2154	A15102	737	G15	3226	A10561	564
G1448	1005	A1288	457	G1460	1644	A6532	536	G8244	2706	A6532	410
G1	826	A10445	207	G1	1590	A16440	470	G39	2489	A3224	300
G266	824	A46632	180	G1499	1565	A151	449	G1460	2108	A3370	292
G51	736	A126123	175	G1448	1424	A345	425	G1118	1381	A158534	268
G44	639	A57998	152	G42	1350	A53200	414	G51	1081	A5745	240
G45	628	A10544	147	G22	1072	A2669	380	G1448	978	A4476	225

Table 5's CRM analysis meticulously examines customer segmentation and market dynamics based on e-invoice data during the months of October, November, and December. This period showcases significant transactional activities from sellers such as G15 and G8013, reflecting the efficacy of their marketing strategies and customer relationship management. The substantial increase in transactions by G8013 in November and December particularly highlights its dominance in the market during these months, suggesting a successful expansion of its customer base through effective marketing campaigns or loyalty programs. Conversely, the consistently high transaction volumes associated with buyers like A6532 and A1288 emphasize their strategic importance as robust purchasers to the sellers, underscoring the necessity for businesses to cultivate long-term relationships with such clients. The CRM analysis provides pivotal insights into understanding customer behaviors and market trends, enabling businesses to devise customized strategies targeted at specific customer segments and solidify their market positions. These insights are crucial for businesses aiming to gain a competitive edge and expand their market share by enhancing customer satisfaction. This analysis not only underlines the dynamic nature of the market but also highlights the potential for businesses to leverage detailed transactional data to refine their marketing and customer relationship strategies for better alignment with customer needs and preferences.

**Table 6.** 12-month province-based relationship between sender and receiver.

	CITY	SENDER	RECEIVING	PEN NUMBER	AMOUNT
January	İSTANBUL	G42	A10561	7814	1871006,55
	İSTANBUL	G1	A335462	1634	624271,38
	NİĞDE	G927	A31578	1559	24910400,2
	İSTANBUL	G44	A339090	1475	155335,56
	İSTANBUL	G34	A1288	1390	268774,37
	İSTANBUL	G547	A63543	1315	152174,24
	BURSA	G168	A46632	1273	487803,97
	İSTANBUL	G1499	A15102	1054	427971
February	İSTANBUL	G1	A1288	793	130920,6
	İSTANBUL	G1118	A357158	8852	2169844,83
	İSTANBUL	G1118	A51282	7751	1854046,4
	İSTANBUL	G21	A151	7574	5858144,68
	İSTANBUL	G1118	A43782	6027	1701150,29
	İSTANBUL	G1118	A38968	4934	1738852,15
	İSTANBUL	G44	A6706	4529	97313,7
	İSTANBUL	G42	A10561	4009	857450,81
March	ANKARA	G74	A170899	3090	2680321,81
	İZMİR	G1745	A494	2742	4459331,46
	İSTANBUL	G42	A10561	7341,00	2401341000000,00
	İSTANBUL	G547	A23973	5619,00	1536771000000,00
	İSTANBUL	G21	A151	3382,00	2320540000000,00
	İSTANBUL	G2103	A4476	3000,00	5131700000000,00
	İZMİR	G1745	A494	2815,00	8108454000000,00
	BURSA	G169	A3051	1834,00	4350236000000,00
İSTANBUL	G1	A1288	1824,00	4421429000000,00	
ANKARA	G1561	A18489	1628,00	481628800000,00	
ANKARA	G3222	A32723	1543,00	3690151000000,00	

Table 7. 12-month province-based relationship between sender and receiver (Cont'd).

	CITY	SENDER	RECEIVING	PEN NUMBER	AMOUNT
April	İSTANBUL	G42	A10561	7999,00	2097325,58
	İZMİR	G3708	A61718	3386,00	4563442,68
	İSTANBUL	G3202	A61985	3300,00	73433,19
	İSTANBUL	G21	A151	2627,00	2067914,31
	BURSA	G168	A46632	2181,00	987281,55
	İSTANBUL	G1	A1288	1670,00	347343,42
	İSTANBUL	G1713	A53459	1659,00	45454,10
	İSTANBUL	G828	A54881	1622,00	91692,10
May	İSTANBUL	G3127	A63777	1376,00	69368,08
	İSTANBUL	G1118	A51282	27133,00	5678617,13
	İSTANBUL	G1118	A68515	15471,00	4259040,83
	İSTANBUL	G1118	A43782	14031,00	4648043,96
	İSTANBUL	G1118	A38968	13621,00	4149428,00
	İSTANBUL	G1118	A68537	7536,00	2592643,82
	İSTANBUL	G1118	A51275	7257,00	2218249,06
	İSTANBUL	G1118	A51278	6959,00	1719773,06
June	İSTANBUL	G1118	A68538	6696,00	2232065,45
	İSTANBUL	G42	A10561	6485,00	2575899,83
	İSTANBUL	G1118	A51282	29827,00	5099106,21
	İSTANBUL	G1118	A68515	22898,00	5158290,06
	İSTANBUL	G1118	A43782	16095,00	3657718,71
	İSTANBUL	G1118	A38968	15520,00	4094732,72
	İSTANBUL	G42	A10561	15328,00	5371360,78
	İSTANBUL	G21	A151	15145,00	15314276,42
July	İSTANBUL	G1118	A68537	8824,00	2028063,06
	İSTANBUL	G1118	A51275	8656,00	1997136,99
	İSTANBUL	G1118	A68538	7834,00	2388308,20
	İSTANBUL	G6312	A129326	7501,00	2071997,49
	İSTANBUL	G42	A10561	7335,00	6604315,46
	İSTANBUL	G21	A151	4429,00	6065923,83
	İSTANBUL	G1	A1288	1815,00	463083,57
	İSTANBUL	G50	A6532	1393,00	554760,13
August	İSTANBUL	G45	A5745	1288,00	8002590,85
	İSTANBUL	G6312	A129330	1255,00	375934,62
	İSTANBUL	G44	A31027	1069,00	76782,35
	İSTANBUL	G44	A63349	1007,00	57450,05
	İSTANBUL	G21	A151	9748,00	9309818,65
	İSTANBUL	G21	A44	3168,00	3092323,76
	İSTANBUL	G1499	A15102	2410,00	1125961,35
	GAZİANTEP	G995	A79237	1763,00	192066,32
September	İSTANBUL	G1118	A38968	1754,00	837490,02
	İSTANBUL	G2201	A15608	1684,00	20295040,72
	İSTANBUL	G50	A6532	1668,00	652986,63
	İSTANBUL	G45	A5745	1622,00	9203701,90
	İSTANBUL	G76	A41985	1527,00	510502,73
	ANTALYA	G7538	A193270	254211824,00	845488,92
	ANTALYA	G7538	A193265	248834848,00	254669,00
	ANTALYA	G7538	A126817	240225328,00	1291750,83
October	ANTALYA	G7538	A193282	221442272,00	294280,30
	ANTALYA	G7538	A193272	173889568,00	166931,22
	ANTALYA	G7538	A193305	162011808,00	633883,97
	ANTALYA	G7537	A193265	152756416,00	206815,53
	ANTALYA	G7538	A193278	143439072,00	1243042,77
	ANTALYA	G7538	A193280	126773792,00	44756,64
	İSTANBUL	G42	A10561	13608,00	5722217,82
	İSTANBUL	G2126	A1288	2002,00	320610,25
October	BURSA	G168	A46632	1742,00	1572671,58
	ANKARA	G763	A34627	1386,00	564253,42
	İSTANBUL	G45	A5745	1147,00	6781245,20
	İSTANBUL	G52	A6532	1146,00	409998,76
	İZMİR	G266	A158534	1090,00	683462,31
	ANKARA	G56	A6532	1042,00	1028152,50
	BURSA	G168	A49518	830,00	438219,11

**Table 8.** 12-month province-based relationship between sender and receiver (Cont'd).

	CITY	SENDER	RECEIVING	PEN NUMBER	AMOUNT
November	İSTANBUL	G1118	A51282	17752,00	6613919,24
	İSTANBUL	G1118	A43782	11457,00	4902972,52
	İSTANBUL	G1118	A68515	10840,00	4084359,68
	İSTANBUL	G1118	A38968	9656,00	4792558,32
	İSTANBUL	G6312	A129326	7744,00	3061943,99
	İSTANBUL	G21	A151	6368,00	5020598,01
	İSTANBUL	G42	A10561	6330,00	3426754,47
	İSTANBUL	G1118	A51275	6151,00	2695834,89
December	İSTANBUL	G8013	A239093	5573,00	660680,08
	İSTANBUL	G42	A10561	10244,00	5591535000000,00
	İSTANBUL	G1118	A68515	5016,00	1885258000000,00
	İSTANBUL	G1684	A25376	4466,00	2368756000000,00
	İSTANBUL	G1118	A51275	3669,00	1779095000000,00
	İSTANBUL	G21	A151	2625,00	2748752000000,00
	İSTANBUL	G3202	A61985	1653,00	412272800000,00
	İSTANBUL	G1	A1288	1582,00	6180978000000,00
	İZMİR	G266	A158534	1581,00	1762418000000,00
İSTANBUL	G23	A6907	1496,00	249631000000000,00	

Table 6-8 represents a monthly shipment table with sender, recipient, city, number of items and amount. Each row contains information for one month. A detailed analysis is made according to the senders and recipients of the months. In the data set for January, the highest number of items and total amount was realized in Istanbul. Senders coded G42, G1 and G927 made significant transactions to receivers coded A10561, A335462 and A31578. Other cities, such as Niğde and Bursa, also witnessed heavy sending activity. In February, senders coded G1118 and G42 stood out in shipments from Istanbul. Significant shipment volumes were also recorded from other cities such as Ankara and Izmir. The total number of items and total value indicate a similar intensity to the previous month. In March, there was a general increase in transactions recorded from cities such as Istanbul, Izmir and Niğde. High-value transactions by senders coded G42 and G2103 were particularly noteworthy. The total amount shows a significant increase compared to the previous months. In April, the high volume of transactions from Istanbul and Izmir stood out. Senders coded G3202 and G1713 recorded significant amounts in their transactions with buyers coded A61985 and A53459. The total number of items and the total amount followed a similar course to the previous months. In May, high value transactions of the sender coded G1118 to different recipients were noteworthy. Generally, high amounts were recorded in transactions from Istanbul. This month indicates a significant increase in terms of the total number of items and the total amount. In June, senders coded G1118 and G21 in Istanbul were observed to have realized particularly high value transactions. There was a significant increase in one transaction from Kocaeli. The total amount continues the growth trend of the previous months. In July, senders coded G6312, G42 and G1 stood out in transactions from Istanbul. A significant increase was observed in one transaction towards the end of the day. In terms of total amount, a course parallel to the previous months was observed. In August, transactions from Istanbul generally recorded high amounts. Transactions from Gaziantep and Kocaeli also involved significant amounts of shipments. In addition, a minor typographical error was detected in the field GONDERER\_SEHIR. In September, there was a significant increase in transactions from Antalya. This month is generally characterized by very large transactions. Except for a typo in Istanbul, the size of the transactions is noteworthy. In October, transactions from Istanbul and Ankara were dominated by senders coded G42 and G52. There was a significant increase in transactions from sender G52 to recipient A6532. The total amount reflects the general trend of the previous months. In November, a large number of transactions from Istanbul and Ankara stood out. The sender coded G1118 was observed to transact extensively with different recipients. The total amount continues the general upward trend of the previous months. In December, transactions from Istanbul, Ankara and Bursa were noteworthy. In particular, it was observed that the sender coded G8026 made high volume transactions to the recipient coded A253131. In general, this month followed a similar trend to the previous months in terms of total amount.

When Table 6-8 is re-examined, the lowest value is recorded as the number of items 662 and the amount of 40,337.74 TL in the submission made from Eskişehir in January. This is the submission with the lowest number of items in January. In the same month, another shipment from Istanbul had 793 items and an amount of 130,920.60 TL. In February, the number of items was 400 and the amount was recorded as 28,994.51 TRY in a submission from Icel. In March, a shipment from Ankara was recorded as 972 items and the amount as 9,175,680,000.00 TL. In April, in another shipment from Istanbul, the number of items was 995 and the amount was recorded as

765,543.33 TL. In a shipment from Istanbul in May, the number of items was 1,583 and the amount was 339,052.89 TL. In June, a shipment from Kocaeli reported 2,892 items and an amount of 42,702,541.84 TRY. In July, a shipment from Ankara reported 793 items and an amount of TRY 598,157.29. In another shipment from Istanbul in August, the number of items was 806 and the amount was recorded as 23,553.35 TL. In September, the number of items in a shipment from Antalya was quite high and the amount was recorded as 845,488.92 TL. In October, the number of items in a shipment from Istanbul was 555 and the amount was recorded as 13,965,840.57 TL. In November, the number of items in a shipment from Bursa was 830 and the amount was recorded as 438,219.11 TL. In December, the number of items in a shipment from Istanbul was 629 and the amount was 730,721.00 TL.

In this study, following the CRM analysis, RFM analysis was performed and the results are given in Table 9.

**Table 9.** RFM analysis results.

Master_Id	Recency	Frequency	Monetary	Recency_Score	Frequency_Score	Monetary_Score	Rf_Score
52 (G7538)	19 (A193270)	254211824	845488,9	4	5	3	45
34 (G42)	125 (A10561)	248834848	254669	4	5	2	45
52	5 (A126817)	240225328	1291751	5	5	3	55
52	23 (A193282)	221442272	294280,3	4	5	2	45
52	20 (A193272)	173889568	166931,2	4	5	1	45
44 (G59)	44 (A26089)	434	4607550	4	1	4	41
44	69 (A36769)	414	874649,9	3	1	3	31
1 (G1099)	6 (A1288)	410	293034,1	5	1	2	51
9 (G154)	61 (A334750)	400	28994,51	3	1	1	31

According to the RFM analysis results in Table 9, customer segmentation was done in two different groups. G7538 (Master\_Id 52) and A193270 (Recency 19) represent a highly active and valuable customer segment, with a transaction volume of 254211824 units and a monetary value of 845488.9 units. They scored 4, 5, and 3 for Recency, Frequency, and Monetary values, respectively, achieving a total RF score of 45. This indicates they have recently made purchases, are frequent shoppers, and spend above-average amounts.

G42 (Master\_Id 34) and A10561 (Recency 125) have a transaction volume of 248834848 units and a monetary value of 254669 units. Their scores for Recency, Frequency, and Monetary values are 4, 5, and 2, respectively, resulting in a total RF score of 45. This shows that they have also been active shoppers recently, but despite frequent shopping, their spending is lower compared to the previous group.

Other “52” Master\_Id customers: They have conducted transactions with high monetary values with different receiver codes (A126817, A193282, A193272) and have high Recency and Frequency scores. Notably, transactions to A126817 achieved the highest RF score of 55, indicating these customers shop very frequently and have recently made high-volume purchases.

Lower Score Customers (G59 and G154): Their lower Frequency and Monetary scores indicate these customer segments shop less frequently and spend lower amounts. The specified RF score of 51 for G1099 (Master\_Id 1) and A1288 suggests this customer, despite infrequent shopping, possesses a high monetary value.

When Tables 6-8 and 9 are re-examined, it is observed that for all months, shipper G42 and seller A10561 are jointly found to be the best performing senders in both RFM and CRM analyses. Thus, it is observed that the results of both CRM and RFM analyses are consistent with each other.

CRM and RFM analyses share similarities, but they emphasize different aspects of customer behavior. CRM analysis focuses on managing customer relationships and tracking customer interactions, while RFM analysis evaluates customer behavior in terms of purchase frequency, recency of purchases, and monetary value. Both analyses contribute to customer segmentation and understanding of customer behavior, but CRM is more focused on transaction volume and customer loyalty, whereas RFM emphasizes shopping habits and spending patterns. In Table 10, the G42 - A10561 pair is identified as a frequent shopper with low monetary value in both analyses, while the G7538 - A193270 pair shows strong performance in both CRM and RFM, with high.



**Table 10.** Comparison of RFM and CRM analyses.

Customer ID	CRM Analysis (Sender-Receiver Pairs with Highest Transaction Volume)	RFM Analysis (Recency, Frequency, and Monetary Value)	Evaluation
G42 - A10561	One of the sender-receiver pairs with the highest transaction volume	Recency: 4, Frequency: 5, Monetary: 2, RF Score: 45	Among the most active pairs in both CRM and RFM analyses, but the monetary value is relatively low according to the RFM analysis
G7538 - A193270	The pair with the highest transaction volume	Recency: 4, Frequency: 5, Monetary: 3, RF Score: 45	Strong performance in both analyses, showing high frequency and monetary value.
G1099 - A1288	Moderate transaction volume	Recency: 5, Frequency: 1, Monetary: 2, RF Score: 51	Despite infrequent purchases, the high monetary value makes this customer strategically significant.

## 5. Discussion and Conclusion

In this study, CRM and RFM analyses were performed on the annual sales data obtained as a result of e-invoice usage service to customers. When the results of the analysis were analyzed, the number of transactions belonging to the SENDER, RECIPIENT and parties in the top 10 every month were extracted. Thus, the most active companies in e-invoice service transactions were determined. Although the number of transactions is important in the activity of companies, it should be stated that the number of purchases and material amount values of each transaction are also important values. With the study, valuable customer segmentation based on the number of transactions and number of items was made for the customer profiles of the sender and receiver sides. In addition, transaction volumes by province were analyzed in terms of senders and receivers. With this study, analysis results that will contribute to more systematic pricing, campaign and customer relationship management for the sender and receiver companies (customers) to which e-invoice service is provided were obtained. In the future, it aimed to carry out studies for the predictive analysis of these data to shape future projections with regression-based models and to identify sectoral-oriented customer patterns in trade data.

## References

- [1] Marcus C. A practical yet meaningful approach to customer segmentation. *J of Cons Mark* 1998;15(5):494–504.
- [2] Jonker JJ, Piersma N, Van Den Poel D. Joint optimization of customer segmentation and marketing policy to maximize long-term profitability. *Exp Sys w Apps* 2004;27(2):159–68.
- [3] Kim SY, Jung TS, Suh EH, Hwang HS. Customer segmentation and strategy development based on customer lifetime value: A case study. *Exp Sys w Apps* 2006;31(1):101–7.
- [4] Lemon KN, Mark T. Customer Lifetime Value as the Basis of Customer Segmentation. *J of Relation Mark* 2006;5(2–3):55–69.
- [5] Cooil B, Aksoy L, Keiningham TL. Approaches to Customer Segmentation. *J of Relation Mark* 2008;6(3–4):9–39.
- [6] Chan C. Intelligent value-based customer segmentation method for campaign management: A case study of automobile retailer. *Exp Sys w Apps* 2008;34(4):2754–62.
- [7] Namvar M, Gholamian MR, KhakAbi S. A Two Phase Clustering Method for Intelligent Customer Segmentation. In: *Modelling and Simulation 2010 International Conference on Intelligent Systems 2010*; p. 215–9.
- [8] Wu RS, Chou PH. Customer segmentation of multiple category data in e-commerce using a soft-clustering approach. *Elect Com Res and Apps* 2011;10(3):331–41.
- [9] Hizioglu A. Soft computing applications in customer segmentation: State-of-art review and critique. *Exp Sys w Apps* 2013;40(16):6491–507.
- [10] Hosseini M, Shabani M. New approach to customer segmentation based on changes in customer value. *J Market Anal* 2015; 3(3):110–21.
- [11] Brito PQ, Soares C, Almeida S, Monte A, Byvoet M. Customer segmentation in a large database of an online customized fashion business. *Robo and Comp-Integ Manufact* 2015;36:93–100.
- [12] Kansal T, Bahuguna S, Singh V, Choudhury T. Customer Segmentation using K-means Clustering. In: *2018 International Conference on Computational Techniques, Elec and Mec Sys (CTEMS) [Internet]*. 2018. p. 135–9.
- [13] Amnur H. Customer relationship management and machine learning technology for identifying the customer. *JOIV: Inter J on Inf Vis* 2017; 1(1):12–5.
- [14] Al-Fedaghi S, Al-Otaibi M. Service-oriented systems as a thinning machine: A case study of customer relationship management. In: *2019 IEEE 2nd International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT) [Internet]*. IEEE; 2019; p. 235–42.

- [15] Christy AJ, Umamakeswari A, Priyatharsini L, Neyaa A. RFM ranking–An effective approach to customer segmentation. *J of King S Uni-Com and Inf Sci* 2021; 33(10):1251–7.
- [16] Taşabat SE, Esra A. Recycling project with rfm analysis in industrial material sector. *Sig J of Eng and Nat Sci.* 2020; 38(4):1681–92.



## Cip, Harput, Yeniköy Çevresindeki Elazığ Volkanitlerinin Petrografisi ve Mineral Kimyası

Sevcan KÜRÜM<sup>1\*</sup>, Safiye AYDEMİR<sup>2</sup>, İsmail YILDIRIM<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1\*</sup> skurum@firat.edu.tr, <sup>2</sup> saydemir2300@gmail.com, <sup>3</sup> iyildirim@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 18/01/2024;

Kabul/Accepted: 10/09/2024)

**Öz:** Doğu Anadolu Volkanik Provensi içerisinde tanımlanan Elazığ volkanitleri, Elazığ merkezi yakın çevresinde üç bölgede (Cip, Harput, Yeniköy) yayılım gösterir. Efüzif ve eksploziv volkanizma ürünlerinden oluşan volkanitlerin lavları kalın istifler oluşturmazken, genellikle bazaltik cüruf konileri oluşturan piroklastitler görece daha fazla kalınlığa sahiptir. Kayaçların petrografik incelemeleri, ana mineral bileşiminin plajiyoklas, olivin, piroksen mineralinden oluşmuş, zayıf alterasyonlu, porfirik, veziküler ve akıntı dokulu bazalt, olivin bazalt ile nefelin ve lösit içeren alkali bazaltlardan oluştuğunu göstermiştir. Mineral kimyası analiz verilerine göre, tüm örneklerde labradorit en yaygın plajiyoklas minerali iken, Yeniköy örneklerinde anortit, Harput örneklerinde ise andezinden sanidine kadar değişim gözlenmektedir. Piroksen mineralleri ise ağırlıklı olarak bronzit ve diopsit bileşimli olup, Mg ve Ca içeriği yüksek bir sistemden kristalleşmiştir. Minerallerle ilgili varyasyon diyagramlarında bölgelere göre mineral bileşimlerine bağlı olarak zayıf farklılıklar görülmektedir. Cip Köyü örnekleri olivin mineral içeriği bakımından, Harput örneklerine göre özellikle Mg bakımından zayıf, Ca bakımından zengindir. Buna karşın, piroksen minerallerine göre Al, Mn ve Ca bakımından görece daha fakir ancak Fe ve Mg'ca daha zengindir. Petrografik ve mineral bileşimlerinin element içerikleri, bu volkanitlerin fraksiyonlaşmayla beraber magma karışımından etkilenen farklılaşmış iki magmanın düşük basınç koşullarında oluşmuş ürünü olabileceğini işaret etmektedir. Amfibollerin de magmatik ve metamorfik özellikte bulunmaları, metasomatizma ve buna etken olan yitim bileşenlerinin magma farklılaşmasında önemli olabileceğini düşündürmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Elazığ volkanitleri, alkali bazalt, bazaltik cüruf, mineral kimyası.

### Petrography and Mineral Chemistry of Elazig Volcanites around Cip, Harput and Yenikoy

**Abstract:** Elazığ volcanites, defined within the Eastern Anatolian Volcanic Province, are distributed in three regions (Cip, Harput, Yeniköy) around the center of Elazığ. While the lava of volcanites consisting of effusive and explosive volcanism products do not form thick stacks, pyroclastics, which generally form basaltic slag cones, have a relatively much thicker thickness. Petrographic examinations of the lavas have shown that the main mineral composition consists of weakly altered, porphyritic, vesicular and flow-textured olivine basalts consisting of plagioclase, olivine and pyroxene minerals, and alkaline basalts containing nepheline and leucite. According to mineral chemistry analysis data, while labradorite is the most common plagioclase mineral in all samples, a change from anorthite to sanidine is observed in Yeniköy samples and from andesine to sanidine in Harput samples. Pyroxene minerals have a bronzite and diopside composition and appear to crystallize from a system with high Mg and Ca content. In the variation diagrams related to minerals, weak differences are observed between the samples depending on their mineral composition. In terms of olivine mineral content, Cip village samples are relatively poorer in Al, Mn and Ca than pyroxene minerals, but richer in Fe and Mg, although they are particularly weak in Mg and rich in Ca content, compared to Harput samples. The orientations of the element contents of petrographic and mineral compositions indicate that these volcanics may be the product of two differentiated magmas formed under low pressure conditions, affected by the magma mixture along with fractionation. The fact that amphiboles also have magmatic and metamorphic properties suggests that metasomatism and the subduction components that because it may be important in magma differentiation.

**Key words:** Elazığ volcanics, alkali basalt, basaltic slag, mineral chemistry.

#### 1. Giriş

Volkanizma, yerkürenin evrimi süresince, meydana gelen farklı jeolojik süreçlerin izlerini yansıtan önemli bir olgudur [1-3]. Doğu Anadolu'daki yaygın volkanizma, genellikle çarpışma kuşaklarına özgü volkanizmayı ve dolayısıyla çarpışma sonrası jeodinamik sistemin bileşenlerini karakterize etmektedir [4-7]. Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki volkanizmanın jeodinamik gelişiminin Avrasya, Afrika ve Arabistan gibi üç ana levhanın göreceli hareketi tarafından yönetildiği [8,9] ancak genel anlamda, bu bölgenin tektonik çerçevesinin, Neotetis'in kapanmasını takiben, Arap ve Anadolu levhalarının çarpışması ve sıkışmanın devamıyla ilgili olduğu kabul edilmektedir [9,5]. Dünyadaki kıtasal çarpışma örneklerinin en iyi görüldüğü yerlerden birisi olarak kabul edilen [10] Doğu Anadolu Bölgesi'nde sıkışmanın etkisiyle farklı zamanlarda farklı jeodinamik etkiler ile ve

\* Sorumlu yazar: skurum@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0001-6121-5564, <sup>2</sup>0000-0002-8966-1424, <sup>3</sup>0000-0001-5588-1210

çoğunluğunun çarpışma-çarpışma sonrası oluştuğu ileri sürülen oldukça yoğun volkanizma olayları gelişmiştir. Bu olayların bazı bölgelerde ~ 1 km kalınlığa varan volkanik istifler oluşumuna sebep olduğu belirtilmektedir [11].

Elazığ volkanitleri yakın kuzeyindeki Geç Miyosen Tunceli bazaltlarının, Avrasya-Arabistan yakınsamasına bağlı yay volkanizmasını temsil ettiği kabul edilir. Elazığ volkanitlerinin ise bölgenin jeodinamik sisteminin göstergelerinden olan magmatik aktivite sonucu ve bölgedeki en son magmatizma ürünü olan Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay sistemlerini oluşturan doğrultu atımlı hareketin başlamasından sonra yerleştiği belirtilir [7]. Buna bağlı olarak Elazığ volkanitlerinin 1,4 ile 1,9 My (Kuvaterner) yaş verisiyle, geç Miyosen (16,3–15,5 My) yaşlı Karabakır Formasyonu/Tunceli bazaltlarından farklı olduğu bilinmektedir [5,12,13]. Birbirinin coğrafik devamı şeklinde bulunan ve morfolojik olarak da benzeyen Elazığ volkanitleri için, bazı çalışmalar hariç genel olarak son yıllardaki çalışmalara kadar Karabakır Formasyonu tanımı benimsenmiştir [5,7,14,15,16,17].

Bu çalışmada, Elazığ volkanitleri olarak tanımlanan ve Elazığ il merkezinin yakın çevresinde Cip Köyü, Harput-Karataş Tepe ve Yeniköy çevresi olmak üzere üç farklı lokasyonda yayılım gösteren volkanizmanın; yayılım özellikleri ile mineralojik-petrografik ve mineral kimyası özellikleri incelenmiş aynı jeolojik dönem içerisinde meydana gelmiş bu volkanizmanın birbirleriyle denestirmesi yapılarak, mineral-petrografik özellikleri ortaya konmuştur.

## 2. Materyal ve Yöntem

Arazi çalışmaları sırasında tüm bölgeyi kapsayacak ve araziye en iyi temsil edecek şekilde alınan 64 el örneğinin kesitleri Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği İnce Kesit Laboratuvarında yapılmıştır.

Çalışma konusu volkanitlerin Cip-Harput ve Yeniköy çevresindeki yayılımlarından alınan dört örneğin mineral kimyası analizleri, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'de yaptırılmıştır. Bu analizlerin yapımında kullanılan ince kesitlerin hazırlanması ve parlatılması bu merkezde yapılmış ve Zeiss Evo 50 marka taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Mineral kimyası analizleri JEOL marka JXA 8230 Model cihaz kullanılarak 20Kv voltaj ve 15NA akım altında belirlenmiştir. EPMA'dan (Elektron Prob Mikro Analiz) oksit formunda elde edilen mineralin majör ve minör elementleri katyon değerlerine (apfu= atoms per formula unit) dönüştürülerek mineral bileşimleri tespit edilmiştir.

## 3. Stratigrafi

Çalışma bölgesinin stratigrafisi temelde Permo-Triyas yaşlı Keban Metamorfileri ile başlayıp, Elazığ Magmatitleri (Geç Kretase), Harami Formasyonu (Üst Kampaniyen-Maastrichtiyen) ve Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Oligosen) ile devam etmekte ve Pleyistosen yaşlı Elazığ volkanitleri ile sonlanmaktadır (Şekil 1a, b).

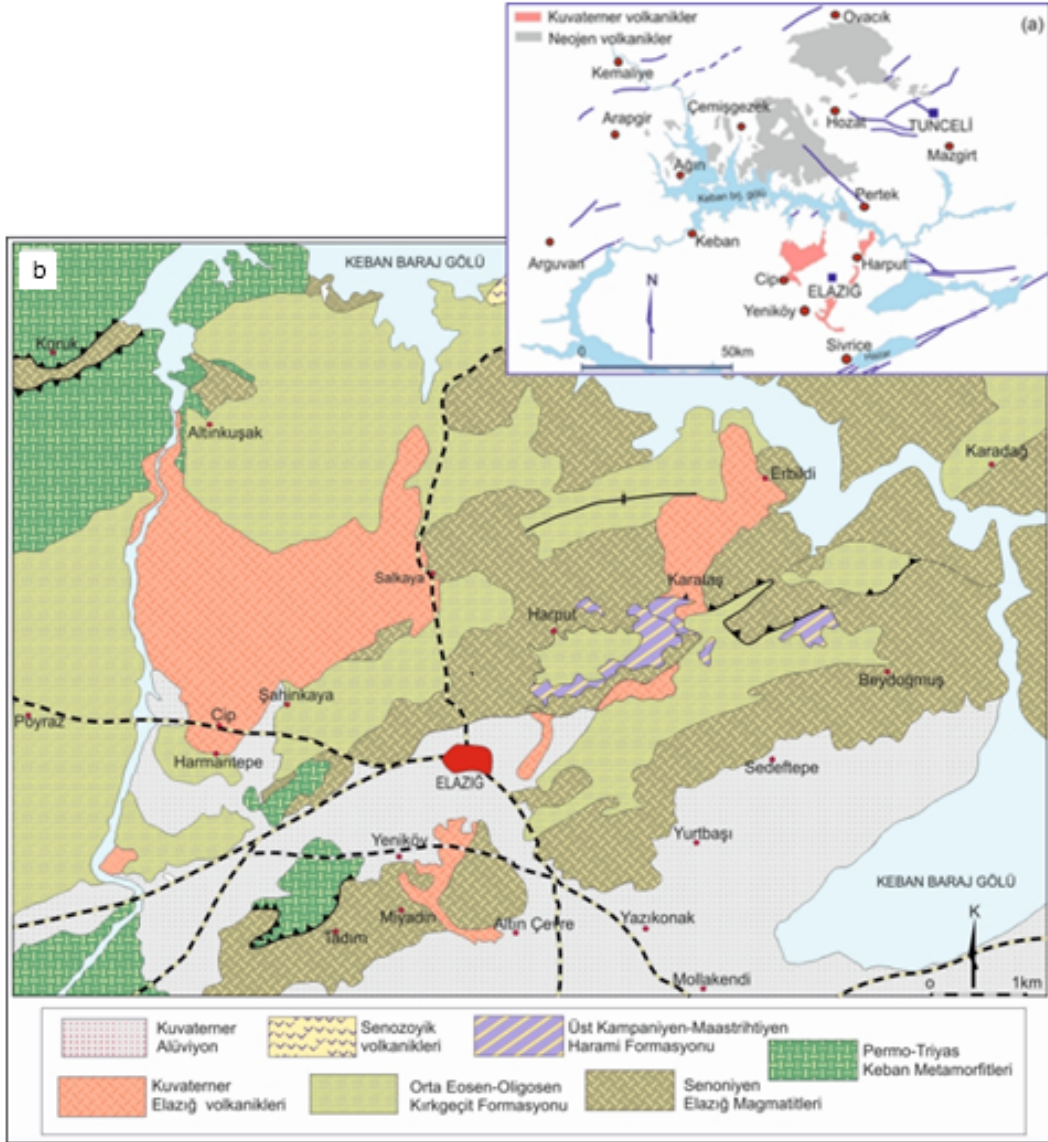
Keban Metamorfileri, ilk kez Özgül [18] tarafından tanımlanmıştır. Elazığ'ın kuzeybatısında Keban ilçesi ve çevresinde oldukça geniş yüzeyleme vermektedir (Şekil 1b). Birimi oluşturan ve oldukça kalın istif sunan, sıg denizel ortam çökellerinin Erken Permiyen-Geç Triyas'ta çökeldiği [19] ve Jura-Alt Kretase'de bölgesel metamorfizmaya uğradığı [20] bilinmektedir. Metamorfitler, Elazığ güneyinde Yeniköy ve Tadım çevresinde Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri üzerine bindirme fayı ile yerleşmiştir.

Elazığ Magmatitleri, ilk kez Perinçek [22] tarafından Yüksekova Karmaşığı olarak adlandırılan birimin Elazığ çevresindeki kesimi için kullanılmıştır. Turan vd. [23] tarafından Elazığ Magmatitleri olarak tanımlanan Geç Kretase yaşlı bu magmatik kayalar, çalışma bölgesinde, granit, diyorit bileşimli plütonik kayalar ile bazikten asidik bileşime değişen volkanik kayalar ve piroklastik kayalar litolojisinde gözlenmektedir. Bu magmatitlerin oluşum mekanizması bakımından yay volkanitleri ürünleri olduğu genel kabul görmeye birlikte [24-29], farklı olarak okyanus içi yitim zonu üzerinde oluşan ofiyolitik istif ve yay volkanitleri ile bunların üzerinde gelişen ensimatik ada yayı ürünü olduğu da ileri sürülmektedir [30,15]. Elazığ Magmatitleri, çalışma bölgesinde Cip Köyü volkanitlerinin Elazığ-Pertek karayolu güzergâhı doğu tarafı ile Harput ve Yeniköy volkanitlerinin hemen tüm yayılım alanlarında görülmektedir (Şekil 1b).

Elazığ Magmatitlerini uyumlu olarak üzerleyen Harami Formasyonu [31], Harput çevresinde yüzeyleme vermektedir. Birim, Harput çevresinde Kırkgeçit Formasyonu ile tektonik dokanıklı veya uyumsuz ilişkilidir (Şekil 1b).

Elazığ il merkezinin yakın çevresinde geniş yüzeyleme alanına sahip Kırkgeçit Formasyonu (Şekil 1b), Cip Köyü volkanitleri yayılım alanında, Harmantepe köyü doğusunda volkanik kayalar tarafından örtülmüş ve bu kayalarla arasında ince bir pişme zonu oluşmuştur (Şekil 2a).

Bölge stratigrafisinin en genç birimini oluşturan Elazığ volkanitleri, aşağıda detaylı olarak irdelenmiştir.

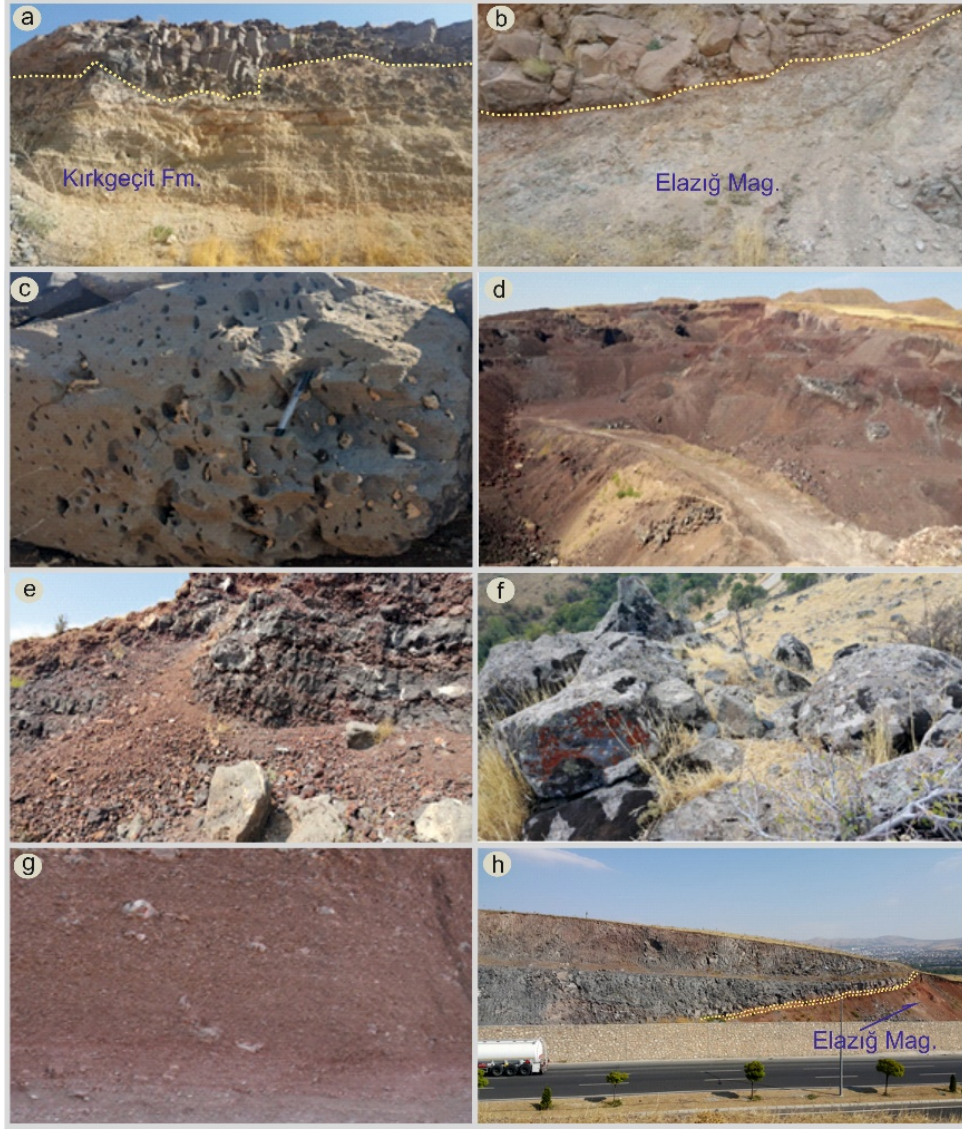


Şekil 1. (a) Elazığ ve çevresinin lokasyon ve (b) jeolojik haritası (MTA [21]'den sadeleştirilmiştir).

#### 4. Bulgular

##### 4.1 Elazığ volkanitleri yayılım özellikleri

Doğu Anadolu'daki yaygın Neojen volkanizmasının batıdaki devamını oluşturan Pleistosen (1,45 – 1,9 My) yaşlı [5,7,12,13] Elazığ volkanitleri, Elazığ merkez ve yakın çevresinde üç farklı lokasyonda efüzif ve eksplozif volkanizma ürünleri olarak yayılım göstermektedir (Şekil 1a, b). Kuzeyde bulunan Cip, Harmantepe ve Salkaya köyü çevresinde yüzeyleyen volkanitler en geniş yayımlı iken güneyde Yeniköy - Güney çevreyolu arasında yüzeyleyen volkanitler ise daha sınırlı alanda yayılmıştır. Doğuda, Harput-Beşoluk-Beydalı yerleşimi çevresinde bulunan volkanitler çok kalın bir piroklastik istif oluşturmalarından dolayı hem morfolojik hem de volkanik aktivite bakımından diğer volkanitlerden farklılık göstermektedir.



**Şekil 2.** Cip Köyü çevresindeki volkanitlerin (a) Kırkeçit Formasyonu ve (b) Elazığ Magmatitleri ile dokanakları ve (c) gaz boşluklu bazik volkanik kayaçlar ile (d) bazik cüruf yığılmasının görünümü. (e) Harput çevresi volkanitlerinin Karataş Tepe’de bazik cüruflar ve (f) bloklanmış volkanik kayaçların görünümü. (g) Yeniköy çevresindeki volkanizmanın bazaltik cüruftan oluşan piroklastik ürünleri ve (h) güney çevreyolu güzergâhında volkanik kayaçlar ile Elazığ Magmatitleri dokanağında gözlenen paleosol oluşumları.

Elazığ volkanitlerinin en yaygın bulunduğu Cip Köyü volkanitleri, Harmantepe köyünden başlayıp kuzeye doğru yayılarak Salkaya ve Toraman köylerinden sonra Keban Barajı göl alanına kadar yayılım göstermektedir. Bu bölgedeki volkanitlerin Kırkeçit Formasyonu (Şekil 2a) ve Elazığ Magmatitleri (Şekil 2b) ile dokanaklarında pişme zonları gelişmiştir. Ayrıca volkanitlerin Elazığ magmatitleri ile olan dokanaklarında ise bazen yaklaşık 40cm’ye kadar kalınlıklarda paleosol seviyeleri bulunmaktadır. Bölgede volkanizma genellikle lav akma yapısı şeklinde -efüzif volkanizma ürünleri- olup daha az olarak volkanik breş ve skorya (bazik cüruf) depolanması litolojisindedir. Efüzif volkanizma ürünü olan lav akma yapıları siyah renkli, ince taneli, veziküller ve amigdoloidal dokuludur. Gaz boşlukları genellikle uzamış elipsoid şekilli olup, bazı bölgelerde daha yoğun olmak üzere tüm istifte gözlenmektedir (Şekil 2c). Arazide genellikle alterasyonsuz, sert ve dayanımlı olarak bulunmalarına karşın yer yer alterasyonlu ve dayanımsız olarak da bulunurlar. Lav akma yapıları çatlaklar nedeniyle genellikle bloklar şeklinde görülürken, Cip Köyü güney sınırlarında yaklaşık 25° güneye eğimli, düzgün ve devamlı olmayan tabakalanma benzeri yapılar gösterir. Cip Köyü doğusunda yayılım gösteren volkanik breşler

oldukça sıkılaştırılmış, açık grimsi renkli, yüzeyde tamamen farklı boyutlardaki bloklardan oluşmuş bir şekilde ve birkaç metre kalınlıklarda bulunurlar. Bazik cüruf konisi şeklinde bulunan piroklastik istif, Şahinkaya köyü kuzeyi ile Altınkuşak köyü yakınında taban yayılımı oldukça geniş, yaklaşık 30m kalınlığında, bordo renkli genellikle eş boy-lapilli- taneli, yer yer birkaç metrelik merceğimsi gri renkli yine piroklastik malzemeler içeren bir görünümde (Şekil 2d). Bu bölgedeki lav akma yapıları eksplozif volkanizma ürünlerine göre çok daha geniş yayımlı ve genellikle birkaç metre veya daha az kalınlık oluşturur. Ancak, paleotopografyaya bağlı olarak normal yayılımından daha kalın olarak da bulunabilmekte ve bu bölgelerde karasal efüzif volkanizmanın karakteristik özelliklerinden olan soğuma çatlakları gözlenmektedir.

Harput çevresindeki volkanizma, Harput doğusunda Karataş Tepe'den başlayıp yine doğuya doğru Beşoluk, Karataş, Erbildi, Beydalı köyleri çevresinde Keban Barajı göl alanına kadar yayılım gösterir. Efüzif ve eksplozif volkanizmanın birlikte görüldüğü en iyi yerlerden birisidir. Bu nedenle bölge volkanizması polijenetik volkanizma olarak tanımlanmıştır [32]. Piroklastik ürünlerin yaklaşık 100 m. kalınlık oluşturduğu Karataş Tepe'nin, bu bölge volkanitlerinin çıkış merkezi olabileceği öngörülmüştür. Bazik bileşimli magmanın oluşturduğu volkanizma ürünleri olan blok ve bombaların geri düşme ürünleri şeklinde, özellikle burada yoğunlaşması bu görüşümüzü desteklemektedir (Şekil 2e). Karataş Tepe'de kalın bir istif oluşturacak şekilde bulunan piroklastik malzeme olan iri blok ve bombalarla beraber tuf gibi daha ince malzemeler de bulunmaktadır.

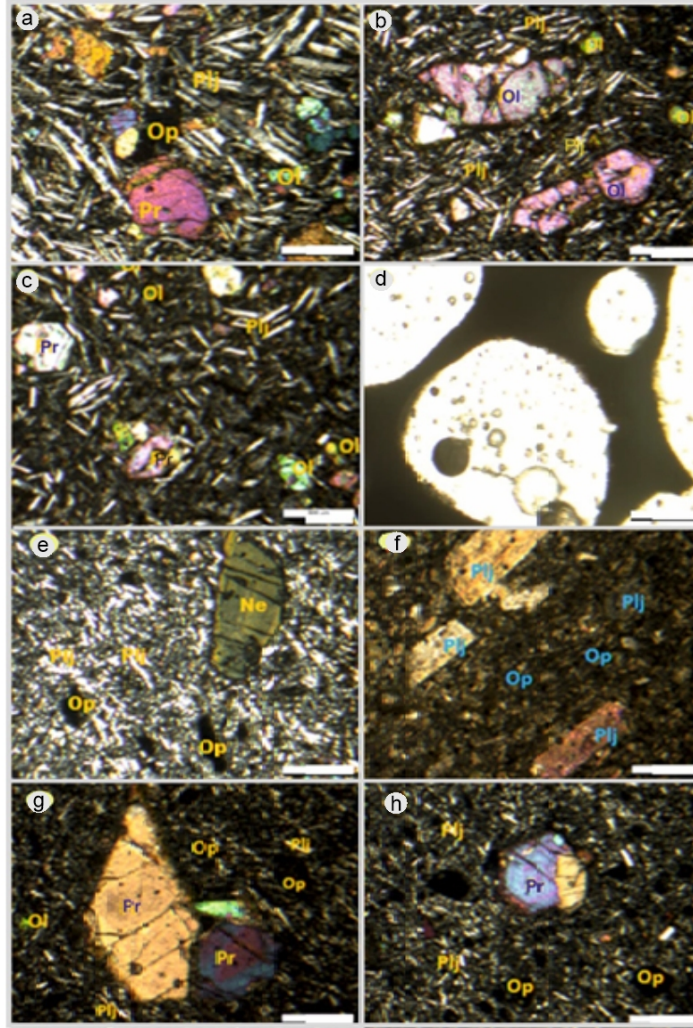
Harput-Karataş Tepe'deki piroklastikler kahverengimsi kırmızı, koyu gri-siyah renklidir. Özellikle istifin üst kısmına doğru oksitlenme çok belirgindir. Bu seviyelerde sıklıkla izlenen ve devamlı olmayan merceğimsi yapılar oluşturan blok ve/veya lav akmalarıyla birlikte yuvarlaklaşmış ve değişik boyutta tekil bloklar bulunmaktadır. Bu bölgede piroklastiklerin çok kalın bir istif oluşturması ve piroklastik malzemelerle lav akma yapılarının birlikte toplanma-yapışma yapısı oluşturması [32], özellikle piroklastik bombalarda soğan kabuğu ayrışmanın oluşması gibi fiziksel özelliklere dayanarak polijenetik volkanizma olabileceği belirtilmektedir [32]. Bu bölgede piroklastikler üzerinde yaklaşık 2 -3m kalınlık oluşturacak şekilde bulunan lav akma yapıları koyu siyah renkli, yoğun çatlaklı ve yer yer yuvarlaklaşmış bloklanmalı, genellikle alterasyonlu ve dayanımsızdır. Ancak Beşoluk Köyü çıkışında; çok sert ve ince taneli, alterasyon göstermeyen, bloklanmış şekilde ve günlenmiş yüzeyleri genellikle yosunla kaplı ve bundan dolayı farklı renkler gösteren, kırık yüzeyleri siyah veya koyu gri renkli kayalar da bulunmaktadır (Şekil 2f).

Elazığ volkanitlerinin yayılımının en az gözleendiği yer Yeniköy-güney çevreyolu bölgesidir. Bu bölgedeki volkanitler, litolojik olarak bazaltik cüruf yığılımlarından oluşan yoğun piroklastik ürünlerle birlikte bazik bileşimli volkanik kayalar içerir. Skorya depolanması olarak tanımlanan [33] bu bölgedeki piroklastik ürünler daha yerel olarak bulunur ve genellikle bazaltik cüruftan oluşmuştur (Şekil 2g). Bu özellikler ile Cip bölgesindeki volkanitlere benzerlik gösterir. Yaklaşık 50 m kalınlığa sahip bu skorya depolanmasının genellikle eş boy taneli, iyi boylanmış ancak az da olsa yaklaşık 1m'ye kadar değişen tekil volkan blokları içerdiği gözlenir. Daha küçük boyutlu ve genellikle iğ ve elipsoid şekilli olan volkan bombaları soğan kabuğu soğuma (eksfoliyasyon) şekilleri göstermektedir. Bu piroklastik istif içerisinde bulunan bazı volkan bombalarının çok yoğun gaz boşluklu ve alterasyonlu olması bu bölge volkanizmasını oluşturan magma veya oluşum sürecinde magmatik bir farklılaşmanın olabileceğini işaret etmektedir. Yeniköy çevresindeki volkanizmanın oluşturduğu lav akma yapıları, genellikle 2-3m'lik kalınlıklar oluşturacak şekilde ve alterasyon göstermezler. Cip Köyü çevresindeki volkanitlerde görüldüğü gibi bu bölge volkanitlerinde de alttaki birimi oluşturan Elazığ Magmatitleri dokanağında paleosol oluşumları gözlenmektedir (Şekil 2h).

## 4.2. Petrografi

Cip Köyü volkanitleri; ana mineral bileşenlerini plajiyoklas, olivin, daha az olarak piroksenlerin oluşturduğu genellikle akıntı dokulu ve daha az porfirik ve intergranüler dokuların görüldüğü bazik bileşimli kayalardır (Şekil 3a,b). Plajiyoklaslar, boyutları değişmekle beraber ince prizmatik kristalli, ikizlenmeli ve çoğunlukla uzamış latalar halinde ve genellikle yönlenmiş olarak bulunur (Şekil 3a). Bu kayalardaki fenokristal fazı oluşturan olivinler kayaç içerisinde çok daha baskın olup piroksenler ile genellikle yüksek girişim renkleri bakımından benzerdir. Olivinler yarı özşekilli ve yuvarlaklaşmış ve yer yer magma karışımının göstergesi olarak kabul edilen iskeletimsi doku gösterir (Şekil 3b). Ayrıca, bölgedeki kayaların genelinde çok yaygın olmamakla beraber bazen özellikle minerallerin kenarları ve çatlaklarında, bazı örneklerde ise nispeten küçük olivin kristallerinin tamamen iddingsitleştiği görülmektedir. Bu kayalardaki diğer mafik mineral bileşenini oluşturan piroksen fenokristalleri ise yoğun çatlaklıdır (Şekil 3a). Fenokristal fazını oluşturan bu mineraller aynı zamanda opak minerallerle beraber kayacın hamur malzemesini oluşturmaktadır. Plajiyoklasların latalar halinde bulunması ve zonlanma göstermelerinden dolayı tür tespiti yapılamamıştır. Ancak bu kayaların mineral bileşimi ve dokusal özelliklerinden olivin bazalt bileşimli olduğu söylenebilir.





**Şekil 3.** Volkanik kayaların mikroskop görüntüleri. Cip Köyü örneklerinin (a) genel dokusal görünümü (b) iskeletimsi olivinler. Harput volkanitleri bazaltik kayalardaki (c) porfirik ve (d) veziküler doku. Yeniköy çevresi volkanitlerinde (e) nefelin ile (f) yönlenmeli ve alterasyonlu plajiyoklas ve (g) piroksen fenokristalleri ile (h) korona dokulu piroksen minerali. Mikroskop görüntüleri çift nikolde 4,5x büyütmede çekilmiştir.

Harput Karataş Tepe volkanitleri esas olarak plajiyoklas, piroksen ve olivin bileşimli kayalardır (Şekil 3c). Genellikle porfirik, akıntı ve veziküler dokunun gözleendiği bu kayalarda alterasyon yaygın olup kalsit ve epidot gibi ikincil oluşumlar bulunmaktadır. Plajiyoklas mineralleri genellikle mikrokristal boyutunda olup, uzamış prizmatik latalar şeklinde, zonlanmalı ve ikizlenmeli, plajiyoklas mikrolitleri ise bazen zayıf da olsa yönlenmelidir. Bu bölgedeki volkanik kayalarda bulunan piroksenler ana fenokristal fazını oluşturmaktadır. Öz - yarıözşekilli olarak bulunan piroksen fenokristalleri canlı polarizasyon renkli ve genellikle çok çatlaklıdır. Olivin mineralleri ise fenokristalden mikrolitik boyuta kadar değişken olup, yarı özşekilli ve özşekilsiz kristalli ve bazen zayıf iskeletimsi dokulu olarak gözlenir. Olivinlerde gözlenen iddingsitleşme çoğunlukla fenokristallerin çatlak ve kenarlarında gözlenirken, hamurda bulunan mikrolitik olivinler de ise tamamını etkilemiş olarak görülmektedir. Bölgedeki bazı kayalarda tamamen yuvarlaklaşmış gaz boşlukları (vezikül) ve soğumanın çok hızlı gelişmesine bağlı olarak hamur malzemesinin camsı bir özellikte olduğu görülmektedir (Şekil 3d). Harput Karataş Tepe bölgesindeki volkanik kayalar için mineral bileşimleri ve dokusal özellikler dikkate alınarak bazalt tanımlaması yapılmıştır.

Yeniköy çevresindeki volkanik kayaların, Cip ve Harput volkanik kayalarıyla benzer mineral içeriği ve dokusal özellikler göstermesine karşın, bu kayalarda yer yer yaklaşık %5 oranında nefelin ve lösit mineral fenokristallerinin bulunması (Şekil 3e), diğer bölge kayalarıyla arasındaki en büyük farkı oluşturmaktadır.

Ayrıca, Yeniköy çevresindeki volkanik kayalarda plajiyoklas minerallerinin çoğunlukla hamur malzemesini oluşturacak şekilde mikrolitik boyutlarda ve daha az olarak bulunan plajiyoklas fenokristallerinin de özşekilli prizmatik kristaller şeklinde bulunması da diğer bölge volkanik kayalarından farklıdır. Bu plajiyoklas mineralleri genellikle yönelmeli olup çok yoğun alterasyon gösterirler (Şekil 3f). Bu bölge volkanik kayalarının mafik mineral bileşimini oluşturan olivin ve piroksenlerin kayada bulunma oranları yaklaşık aynıdır. Yüksek girişim rengine sahip ve farklı boyut ve şekillerdeki fenokristal olarak bulunan bu mineraller kırık-çatlaklıdır. Genellikle kayalardaki fenokristallerde özellikle kenarlar ve çatlaklar boyunca gözlenen alterasyon, mikrolitik hamur malzemesinde de yoğun olarak gözlenmektedir. Ayrıca bu bölge volkanik kayalarındaki piroksenlerde gelişmiş korona dokusu (Şekil 3g), magma karışımının işareti olarak kabul edilebilir. Yeniköy çevresindeki volkanik kayalar, mineral içeriklerinden dolayı alkali bazalt olarak tanımlanmıştır.

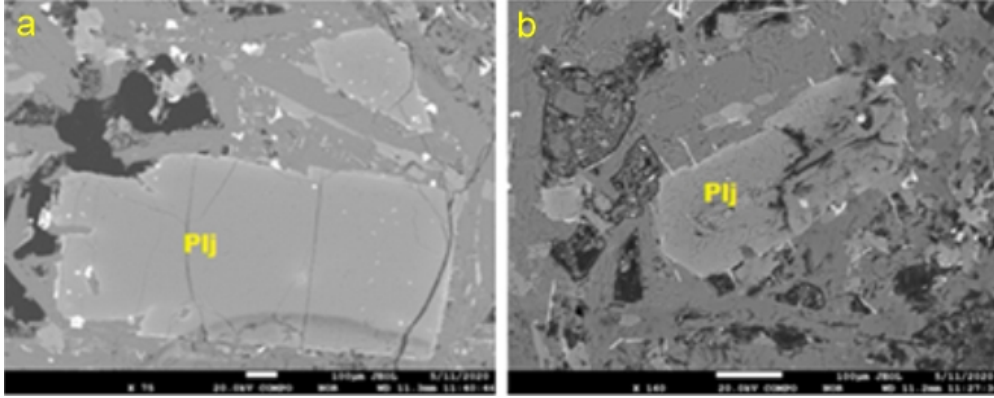
#### 4.3. Mineral kimyası

Çalışma konusu Cip (S4), Harput (S20) ve Yeniköy (S11, S14) çevresindeki volkanik kayalardan alınan dört örnekte, plajiyoklas, olivin, piroksen ve amfibol minerallerinde kimyasal analizler gerçekleştirilmiş ve volkanizmanın oluşumunda etkili olan süreçler araştırılmıştır.

##### 4.3.1. Plajiyoklas

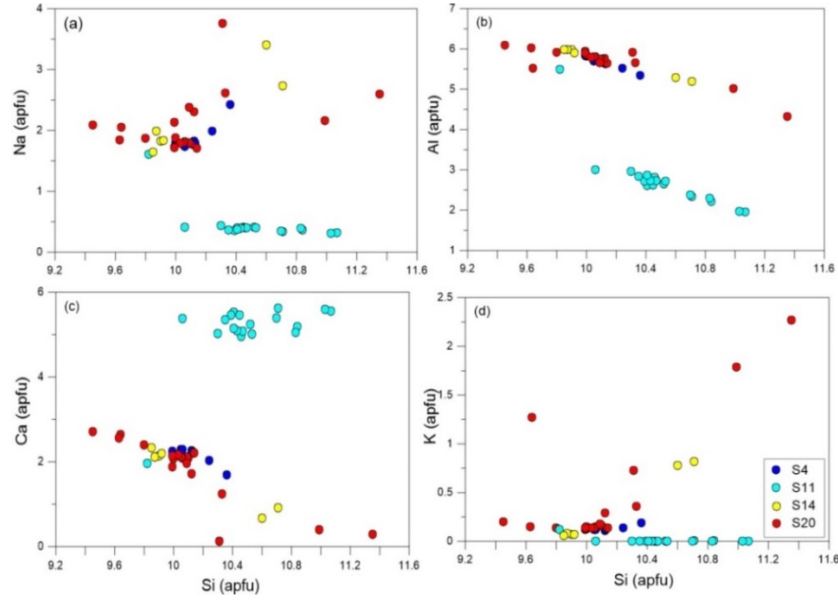
Belirtilen dört örnekte, analizleri yapılan farklı sayıdaki plajiyoklas minerallerinin mineral bileşimleri tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo Ek1-4’de verilmiştir. 32 oksijen atomuna dayanarak yapılan hesaplamalarda Yeniköy S11 nolu örneğin element ve mineral bileşimlerinin diğer örneklerden farklı olduğu ve buna karşın diğer örneklerdeki tüm minerallerin kimyasal bileşimlerinin benzer bileşim aralıklarına sahip olduğu ve bu örneklerde Fe ve Ba’un kimyasal bileşimlerinin ihmal edilebilir miktarlarda olduğu belirlenmiştir (Tablo Ek1-4).

Cip Köyü volkanitlerinin olivin bazalt bileşimli S4 örneğinde, plajiyoklas mineralleri tipik olarak fenokristal boyutundan mikro kristal boyutuna değişim gösterir. Bu kayaç örneğinde dört farklı plajiyoklas minerali üzerinde toplam 10 noktada ölçüm yapılmıştır (Şekil 4a) (Tablo Ek-1). Harput volkanitleri kayalarından olan S20 nolu bazalt örneğinde (Şekil 4b), dört farklı plajiyoklas mineralinde toplam 19 noktada analiz yapılmıştır (Tablo Ek-2). Volkanitlerin Yeniköy çevresindeki yayılımından alkalibazalt bileşimli iki örnekte (S11 ve S14) yapılan analizlerde ise S11 nolu örnekte dört farklı plajiyoklas mineralinde toplam 19 nokta ile S14 nolu örneğe ait tek bir plajiyoklas mineralinde toplam altı noktada ölçüm yapılmıştır. Sonuçlar Tablo Ek-3 ve Tablo Ek-4’te verilmiştir.



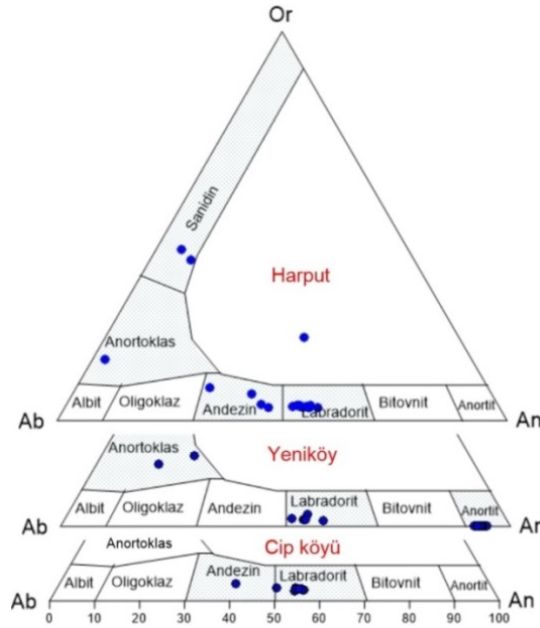
Şekil 4. (a) S4 ve (b) S20 örneğinin BSE-geri yansımali elektron mikroskobu görüntüleri (Plj: Plajiyoklas).

Plajiyoklas minerallerinin elementel ilişkilerini belirlemek için Na (apfu), Al (apfu), Ca (apfu) ve K (apfu)'a karşı Si (apfu) ikili değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 5). Örneklerin Al ve Ca içeriklerinin Si içeriğiyle negatif ilişkili (Şekil 5a, b), ancak artan Si içeriğine bağlı olarak Na ve K içeriklerinin zayıf pozitif eğilim gösterdiği görülmektedir (Şekil 5c, d). Elementlerin bu yönsemeleri normal fraksiyonlaşmaya işaret ederken, S11 nolu plajiyoklas minerallerinin diğer örneklerden farklı bileşimlere sahip olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5. Plajiyoklas minerallerinde elementlerin Si (apfu)'e göre değişim diyagramları.

Feldispatların sınıflandırılmasında  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (albit),  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  (anortit) ve  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  (K-feldispat) arasındaki ilişkilerden yararlanıldığı bilinmektedir. Buna göre, Cip Köyü volkanitleri, olivin bazalt bileşimli S4 örneğinde, plajiyoklas mineralleri üzerinde yapılan analiz ve hesaplamalardan (Tablo Ek-1), albit ( $\text{Ab}_{44-56}$ ), anortit ( $\text{An}_{54-39}$ ) ve ortoklas ( $\text{Or}_{2-3}$ ) içeriklerine göre çoğunlukla labradorit daha az andezin bileşimli olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).



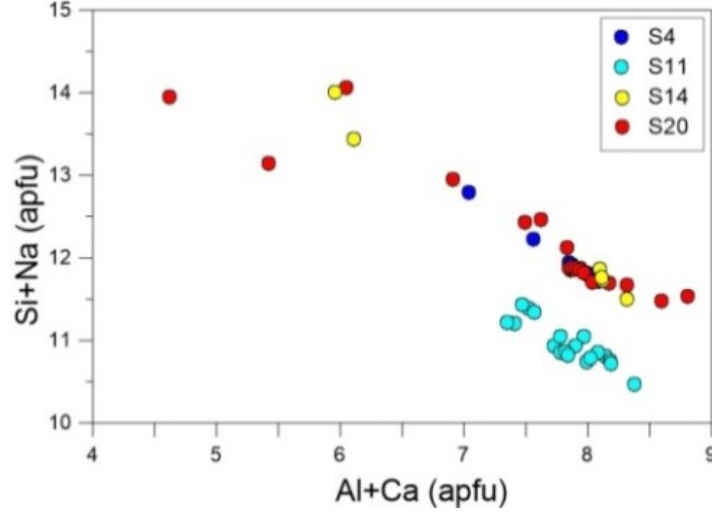
Şekil 6. Elazığ volkanitlerine ait feldispatların Ab-Or-An diyagramı [34].

Harput S20 nolu bazalt örneğinde yapılan analizlerde (Tablo Ek-2) minerallerin albit ( $\text{Ab}_{34-81}$ ), anortit ( $\text{An}_{9-56}$ ) ve ortoklas ( $\text{Or}_{3-44}$ ) içeriklerine göre, büyük çoğunluğunun labradorit, daha az olarak andezin, sanidin ve anortoklas bileşimli olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).

Elazığ volkanitlerinin Yeniköy çevresindeki yayılımından alkali bazalt bileşimli iki farklı (S11 ve S14) örnekte yapılan plajiyoklas analizlerinden S11 nolu örnekte yapılan hesaplamalar sonucunda bu örneğe ait

feldispat minerallerinin genellikle anortit bileşiminde ( $An_{53-94}$ ,  $Ab_{6-44}$ ,  $Or_{03-3}$ ) olduğu, S14 nolu mineralin ise daha düşük anortit ( $An_{14-58}$ ,  $Ab_{41-70}$ ,  $Or_{2-18}$ ) içeriğine bağlı olarak anortoklas ve labradorit bileşimli (Şekil 6) olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçların değişim diyagramındaki dağılımlarla da uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 5).

Tüm örneklerdeki plajiyoklasların Al + Ca (apfu) ve Si + Na (apfu) değişim diyagramında negatif ilişkili olduğu görülmektedir (Şekil 7). Elementler arasındaki negatif ilişki Na ve Ca'un yer değiştirmesinin yanı sıra Al ve Si arasında da yer değiştirmenin var olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 7. Elazığ volkanitlerine ait feldispatların Al + Ca (apfu) karşın Si + Na (apfu) değişim diyagramı.

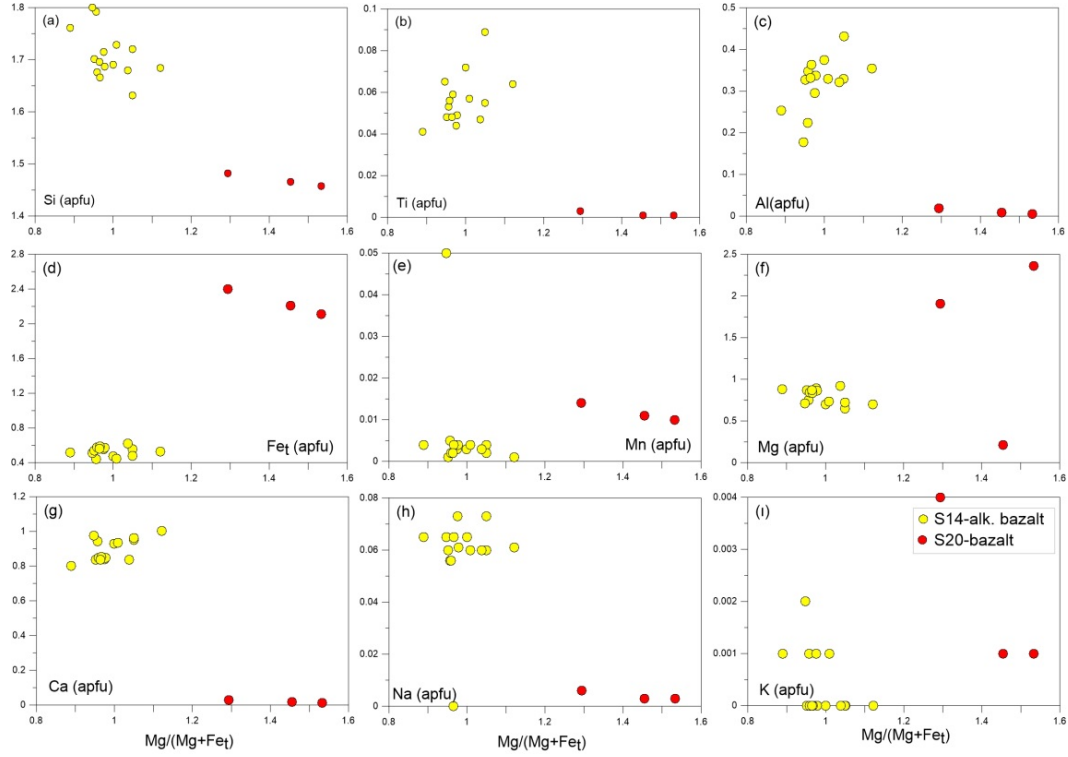
#### 4.3.2. Piroksen

Harput (S20) ve Yeniköy (S14) volkanik kayalarından yapılan piroksen analizlerinde, Harput örneklerinin  $Mg\#_{1.29-1.53}$ , Yeniköy örneklerinin  $Mg\#_{0.89-1.05}$  arasında değiştiği ve aralarında belirgin bir farklılık olduğu görülür (Tablo Ek-5,6). Piroksenlerin bileşimsel değişikliklerini görmek için  $Mg\#$ 'na karşın element (katyon, apfu) içeriklerinin ikili grafikleri çizilmiştir (Şekil 8). Şekilde, Harput ve Yeniköy örneklerin hemen tüm elementlerinin birbirinden farklı dağılımı görülmektedir.

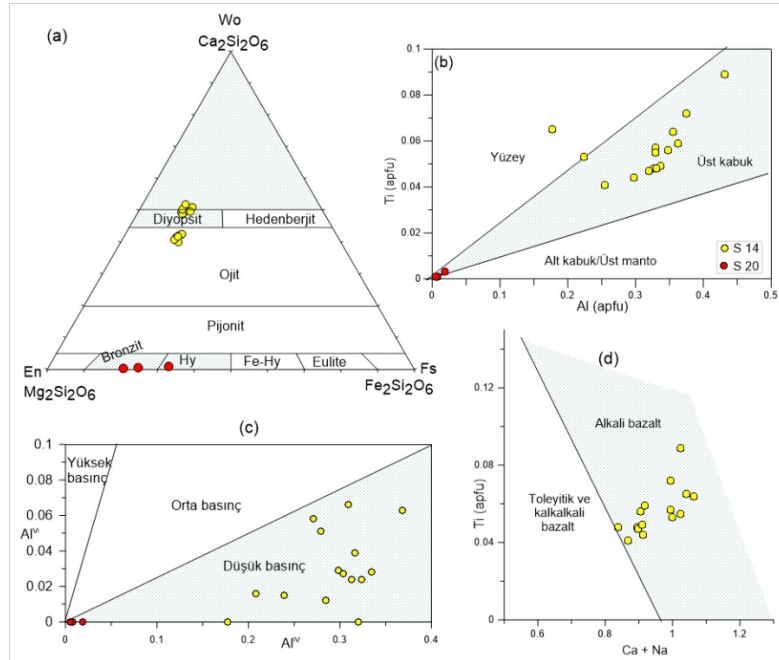
Cip Köyü volkanitleri ile ilgili piroksen analizleri yapılamadığı, Harput örneklerinden de ancak 3 adet analiz yapılabildiği için piroksen minerali analiz verilerine dayanarak genel anlamda volkanitlerin bütünüyle ilgili yorumların çok net olamayacağı bilinmektedir. Harput örneklerinin çoğu element içerikleri bakımından Yeniköy örnekleriyle benzer değerlerde olmasına karşın, Fe ve Mg bakımından Yeniköy örneklerinden düşük, Ca ve Al'ca daha yüksek değerlere sahip olduğu görülür (Şekil 8d, f, g). Bu verilerle, Cip Köyü volkanitlerini temsil eden piroksenlerin kimyasal bileşimlerine göre Ca içeriği düşük bir sistemden kristalleştigi ve zayıf da olsa iki farklı sistemin varlığına işaret ettiği söylenebilir.

Piroksenlerin ana element içeriklerinden hesaplanan  $Mg_2Si_2O_6$  (Enstatit) -  $Ca_2Si_2O_6$  (Vollastonit) -  $Fe_2Si_2O_6$  (Ferrosillit) değerlerine göre, sınıflandırma diyagramında [35] Harput örneklerinin Mg'ca zengin bronzit-hipersten, Yeniköy örneklerinin ise Ca'ca daha zengin diyopsit-Ojit bileşimli oldukları görülmektedir (Şekil 9a).

Piroksenlerde özellikle Al ve Ti elementlerinin mineralin kristalleştigi basınç koşullarına sınırlama getirdiği kabul edilmektedir [36]. Bu amaçla karasal alkali bazaltlar üzerinde yapılan deneylerden kalibre edilmiş olan ve geliştirilen diyagram, bazaltik magma ile denge halindeki piroksenler için Al-Ti oranının basınca bağımlılığını göstermektedir [36]. Bazik bileşimli magmadan kristalleşen piroksenler, yüksek basınç koşullarında oluştuklarından yüksek Al-Ti oranlarına sahip olması gerekmektedir. Buna göre, çalışma konusu örneklerin Al-Ti diyagramında çok düşük Al-Ti oranına sahip olduğu (Şekil 9b), dolayısıyla her iki bölge volkanitlerindeki piroksenlerin farklılık göstermeden düşük basınç koşullarında kristalleştigi görülmektedir (Şekil 9c). Harput örneklerinin düşük Ca içeriği toleyitik veya kalkalkali bazalt kaynağını verirken, Yeniköy örnekleri alkali bazalt kaynağıdır (Şekil 9d).



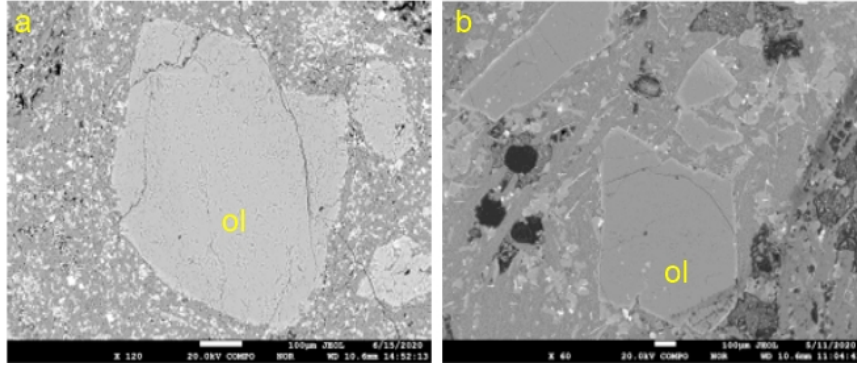
Şekil 8. Piroksenlerin ana element bileşimlerine ilişkin değişim diyagramları.



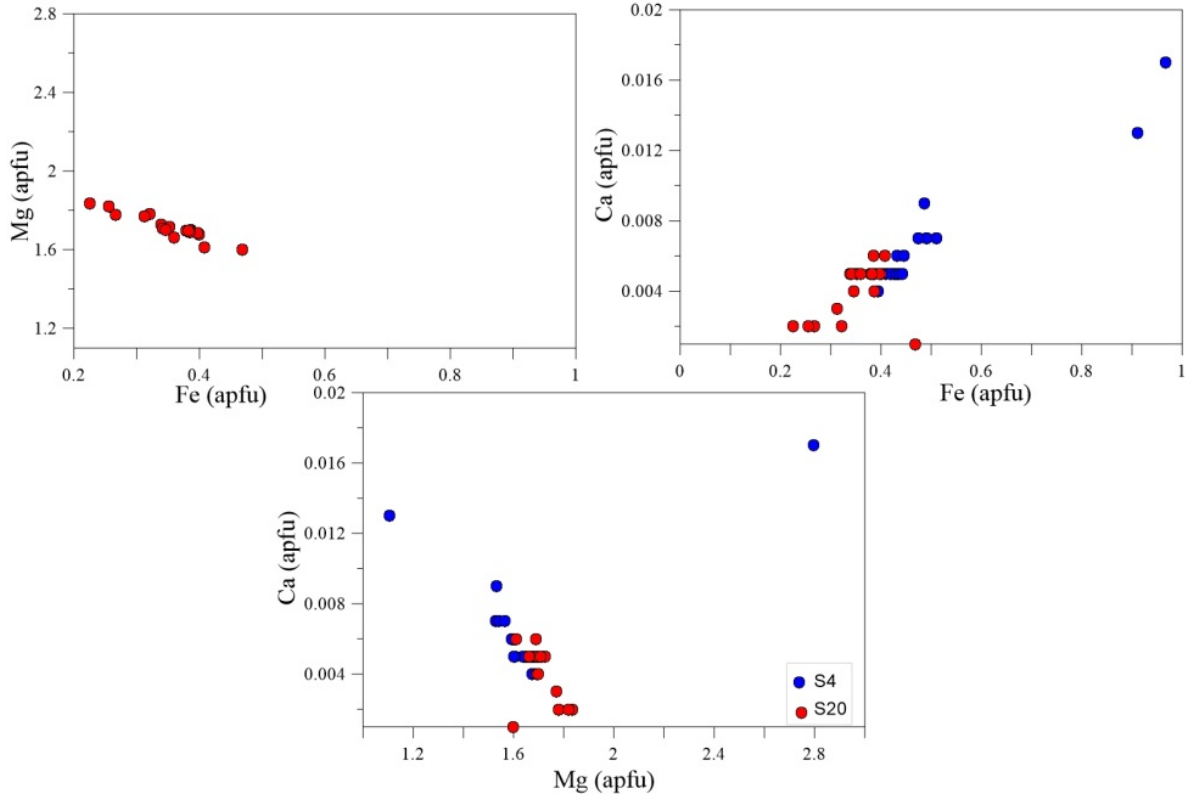
Şekil 9. (a) Harput ve Yeniköy volkanitleri piroksenlerinin isimlendirme [35], (b) Al-Ti içeriklerine kristalleşme derinlik modeli [36] ve (c) Basınç belirleme diyagramı [37] ile (d) Ca+Na – Ti diyagramı [38].

### 4.3.3. Olivin

Çalışma bölgesindeki Cip Köyü ve Harput volkanitlerden analiz yapılan örneklerdeki (S4 ve S20) olivin minerallerinde (Şekil 10) farklı sayıda noktalarda analiz yapılmış ve sonuçlar Tablo Ek-7 ve 8'de verilmiştir. Olivin minerallerinde ana element bileşenlerini oluşturan Mg, Fe, Si ve Ca'un değişimlerini belirlemek için oluşturulan Fe-Ca, Mg-Ca ve Fe-Mg ikili diyagramlarda Mg ile Ca arasında belirgin bir korelasyonun olmadığı gözlenir (Şekil 11). Harput ve Cip Köyü örnekleri element değerlerinin genellikle birbirleriyle uyumlu olmasına karşın Cip Köyü örneklerinden bazılarının en yüksek Mg, Fe ve Ca'a sahip olduğu görülür. Ancak genel anlamda Harput örnekleri Mg'ca, Cip Köyü örnekleri ise Ca'ca daha zengindir. Cip Köyü ( $Fo=79,15-80,73$ ,  $Fa=19,04-21,66$ ) ve Harput örneklerinde ( $Fo=61,67-88,87$ ,  $Fa=10,92-37,95$ ) Mg ile Fe arasında çok belirgin negatif ilişki gözlenmektedir. Elementlerdeki bu değişimler genel anlamda homojen bir magmayı karakterize etmektedir.



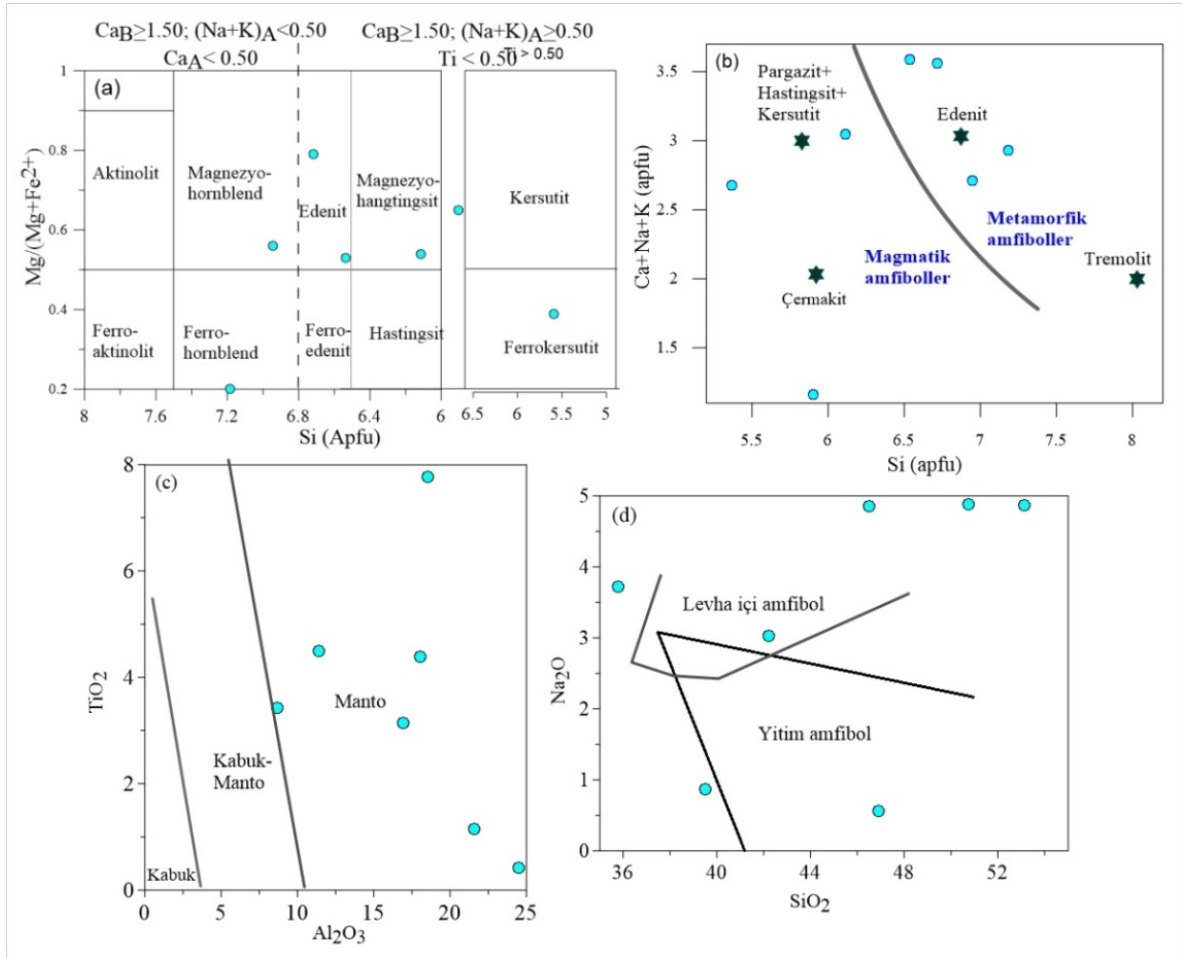
Şekil 10. (a) Yeniköy (S11), (b) Harput (S20) volkanitlerinde olivin minerallerinin BSE görüntüleri.



Şekil 11. Elazığ volkanitlerine ait olivinlerin Fe-Mg, Fe-Ca ve Mg-Ca diyagramları.

#### 4.3.4. Amfibol

Yeniköy çevresindeki S11 nolu alkali bazalt örneğinde bir amfibol mineralinde yapılan analiz verileri Tablo Ek-9'da verilmiştir. Örneklerin  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  ( $Mg\# = 0,2-0,79$ ) değerleri oldukça düşük ve dar bir aralıkta değişirken, mineralin Ca (1,36-3,39), Mg (0,91-2,66) ve Al değerlerinin (1,47-3,91) yüksek olduğu, bu değerlere sahip amfibollerin ise farklı bileşimlerde olduğu görülmektedir (Şekil 12a). Ayrıca amfibolün, Leake [39] tarafından magmatik amfibollerin silis içerik sınırını temsil eden  $Si=7,500$  (apfu) değerlerini aşmadığı görülmektedir. Yine amfibolün  $(Ca + Na + K) - Si$  diyagramında [39] magmatik-metamorfik amfiboller alanında dağılım sergilemesi dolayısıyla bu magmatizmanın metasomatizmadan etkilendiğinin işareti olarak kabul edilebilir (Şekil 12b). Ana oksit bileşenlerinin dağılımına göre Yeniköy volkanitlerindeki amfibol manto kökenli (Şekil 12c) ancak hem levha içi hem de yitim etkili tektonik ortamı işaret etmektedir (Şekil 12d).



**Şekil 12.** (a) Yeniköy çevresindeki amfibolün sınıflandırması [40] ile (b) magmatik-metamorfik amfibol dağılımları [39], (c) köken [41] ve (d) tektonik oluşum ortamlarını [42] gösterir diyagramlar.

#### 5. Sonuçlar

Elazığ çevresinde yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı volkanitler Cip, Harput ve Yeniköy çevresi volkanitleri olarak ayrı incelenmiştir. Farklı lokasyonlarda yayılım gösteren bu volkanitler efüzif ve eksplozif volkanizma ürünüdürler. Efüzif volkanizma ürünü olan bazik bileşimli lavlar, paleotopğrafyaya bağlı olarak yer yer birkaç metre kalınlıklar göstermelerine rağmen genellikle daha incedir. Alterasyonsuz örnekleri koyu gri renkli, sert, dayanımlı ve değişken oranlarda gaz boşlukludur. Her üç bölgede de eksplozif volkanizma ürünü olan bazaltik cüruf depolanmaları bulunmaktadır. Cip ve Yeniköy örnekleri daha çok lapilli boyutundaki piroklastlardan oluşurken, Harput piroklastitlerini oluşturan volkanik malzemeler ağırlıklı olarak tuf ve yer yer volkanik bloklar

da içermektedir. Harput – Karataş Tepe’de bazaltik cürüfler içerisinde merceğimsi ya da ardalanmalı olarak bulunan lav akma yapıları içeren bu kayaçlar bu bölgedeki volkanizmanın farklı olarak çok evreli olduğuna işaret eder.

Cip, Harput ve Yeniköy çevresinde efüzif volkanizma ürünü olan bazik bileşimli bu kayaçların genel olarak benzer petrografik özelliklere sahip olduğu ve plajiyoklas, olivin, piroksen mineral bileşimiyle porfirik, akma ve veziküler doku gösterdiği belirlenmiştir. Cip Köyü örneklerinde olivin minerallerinde iskeletimsi doku görülürken, Harput örneklerinde plajiyoklasların genellikle mikrokristal boyutunda, uzamış prizmatik latalar şeklinde, zonlanmalı ve ikizlenmeli olduğu belirlenmiştir. Yeniköy çevresindeki volkanik kayaçlarda ise mafik minerallerin fenokristal fazında daha baskın olduğu ve ayrıca farklı olarak bu kayaçlarda yer yer yaklaşık %5 oranında nefelin ve lösit minerallerinin bulunduğu belirlenmiştir.

Çalışma konusu volkanitleri oluşturan magmatizma süreçlerinin anlaşılması bakımından, özellikle piroksen ve plajiyoklas fenokristallerinin davranışları önemlidir. Ancak analitik verilerin az ve çok kısıtlı (yalnızca mineral kimyası analizleri) olması ve analizlerin zonlanmayı belirleyecek şekilde olmaması bu konuda sadece genel sınırlamalar yapılmasına izin vermektedir. Buna göre, plajiyoklas mineralleri bakımından, Yeniköy volkanitleri Ca’ca en zengin plajiyoklasları içermesi bakımından diğer örneklerden ayrılmasına karşın, Na ve K içeren anortoklas içermesi ile Harput volkanitlerine benzerlik göstermektedir. Tüm örneklerdeki plajiyoklasların element ve buna bağlı olarak mineral bileşimlerine bakarak, benzer magmatik sisteme sahip oldukları ancak, Yeniköy volkanitlerinin fraksiyonel kristalleşmenin etkisiyle beraber Na ve K bakımından zengin olan alkalın bir magma tarafından beslediği kabul edilebilir. Bu durum, petrografik olarak da belirlenen lösit ve nefelinin varlığıyla da uyumludur. Benzer farklılık piroksen mineral değişimlerinde de gözlenmektedir. Harput örneklerinin Mg’ca daha zengin olmasına karşın, Yeniköy örneklerindeki Ca zenginleşmesi magmanın beslenmesine ya da magma karışımının işareti olarak kabul edilebilir. Ayrıca piroksen minerallerinin düşük Al-Ti içeriğine sahip olması bu minerallerin oluşumunun düşük basınç koşullarında, magmanın yükselme evresinde kristalleştiklerine işaret etmektedir. Olivin minerallerinde de Mg ve Fe oranlarında zayıf da olsa değişimlerin gözlenmesi magma karışımı/kirlenmeyi göstermektedir. Ayrıca bu volkanitlerin Mg açısından zengin olivin fenokristalleri (Fo=62-89) içermeleri, onların yüksek derecede magnezyumlu ana eriyiklerden kristalleşmelerini ima eder. Analizi yapılan tüm örneklerdeki plajiyoklasların Al + Ca (apfu) ve Si + Na (apfu) değişim diyagramlarında gözlenen negatif ilişkiler ve buna sebep olan elementler arasındaki yer değiştirmenin magma karışımı ya da olasılıkla yitimle bağlantılı magma etkileşiminin olabileceğini göstermektedir. Amfibollerin de çok farklı bileşimlerde ve magmatik-metamorfik amfiboller alanında bulunmaları ana ergiyiklerde H<sub>2</sub>O’nun varlığıyla birlikte magma karışım/etkileşim sonucu destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, çalışma konusu volkanitlerdeki petrografik gözlemler ve sınırlı sayıda örnekle yapılan mineral kimyası analizleri-varyasyon diyagramları birlikte dikkate alındığında, farklılaşan iki grup olduğu ancak bu volkanitlerin oluşum ve gelişim süreçlerinin daha iyi anlaşılması için jeokimyasal ve jeokronolojik çalışmalarla desteklenmesi gerektiği düşünülmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma “FÜBAP-MF.19.42” protokol numaralı proje ile Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı Editör ve hakemlere teşekkür ederler.

### **Kaynaklar**

- [1] Innocenti F, Agostini S, Di Vincenzo G, Doglioni C, Manetti P, Savaşçın MY, Tonarini S, Neogene and Quaternary volcanism in western Anatolia: magma sources and geodynamic evolution. *Mar Geol*, 2005; 221, 397–421.
- [2] Karaoğlu Ö, Helvacı C, Ersoy EY, Petrogenesis and 40Ar/39Ar Geochronology of the Volcanic Rocks of the Uşak Güre basin, western Türkiye. *Lithos*, 2010; 119, 193-210.
- [3] Lustrino M, Duggen S, Rosenberg CL, The Central-Western Mediterranean: anomalous igneous activity in an anomalous collisional setting. *Earth-Science Reviews*, 2011; 104, 1–40.
- [4] Aktaş A, Öztüfekçi Önal A, Sayit K, Geochemistry of the post-collisional Miocene mafic Tunceli Volcanics, Eastern Turkey: implications for the nature of the mantle source and melting systematics. *Chem der Erde*, 2019; 79, 113–129.
- [5] Di Giuseppe P, Agostini S, Lustrino M, Karaoğlu Ö, Savaşçın MY, Manetti P, Ersoy Y, Transition from compression to strike-slip tectonics revealed by Miocene-Pleistocene volcanism west of the Karlıova Triple Junction (East Anatolia). *Journal of Petrology*, 2017; 58 (10), 2055-2087.
- [6] Di Giuseppe P, Agostini S, Di Vincenzo G, Manetti P, Savaşçın MY, Conticelli S, From subduction to strike slip-related volcanism: insights from Sr, Nd, and Pb isotopes and geochronology of lavas from Sivas–Malatya region, Central Eastern Anatolia. *International Journal of Earth Sciences*, 2021; 110, 849–874.
- [7] Agostini S, Savaşçın MY, Di Giuseppe P, Di Stefano F, Karaoğlu Ö, Lustrino M, Manetti P, Ersoy Y, Kürüm S, Öztüfekçi-Önal A, Neogene volcanism in Elazığ-Tunceli area (eastern Anatolia): geochronological and petrological constraints. *Italian Journal of Geosciences*, 2019; 138, 435-455.
- [8] Şengör AMC, Yılmaz Y, Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach. *Tectonophy*, 1981; 75, 181-241.



- [9] Dilek Y, Sandvol E, Seismic structure, crustal architecture and tectonic of the Anatolian-African Plate Boundary and the Cenozoic Orogenic Belts in the Eastern evolution Mediterranean Region. Geological Society of London Special Publications, 2009; 327, 127-160.
- [10] Keskin M, Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia. 2005; <http://www.MantlePlumes.org/Anatolia.html>.
- [11] Lin YC, Chung SL, Bingöl AF, Yang L, Okrostsvardize A, Pang KN, Lee HY, Lin TH, Diachronous initiation of postcollisional magmatism in the Arabia-Eurasia collision zone. *Lithos*, 2020; 356-357,105394.
- [12] Seyrek A, Demir T, Pringle M, Yurtmen S, Westaway R, Bridgland D, Beck A, Rowbotham G. Late Cenozoic uplift of the Amanos Mountains and incision of the Middle Ceyhan river gorge, southern Turkey: Ar-Ar dating of the Duzici basalt. *Geomorphology*, 2008; 97(3/4), 321-355.
- [13] Trifonov V, Çelik H, Trikhunkov YI, Simakova AN, Ozherelyev DV, Kolesnichenko AA, The Lower Pleistocene in The Euphrates Valley of Eastern Turkey and inhabitation of earliest hominine in the Caucasus region. XIX INQUA Congress Quaternary Perspectives on Climate Changes, Natural Hazards and Civilization, Poster Presentation, Nagoya, Japan. 2015.
- [14] Naz H, 1979. Elazığ-Palu dolayının jeolojisi. TPAO Rapor No. 1360. 1979.
- [15] Herece Eİ, Acar Ş, Upper Cretaceous-Tertiary geology/stratigraphy of Pertek and its vicinity (Tunceli, Turkey). *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, 2016; 153, 1-44.
- [16] Önal A, Akkuş A, Tunceli-Pertek Jeotermal Alanındaki Sıcak ve Soğuk Suların Hidrojeokimyasal Özellikleri. *Int J Pure Appl Sci*, 2019; 5(1), 53-71.
- [17] Balaban TÖ, Okan ÖÖ, Sançar T, Önal AÖ, Pertek (Tunceli) jeotermal alanının antropojenik kirliliğinin değerlendirmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 2020; 63, 83-96.
- [18] Özgül N, Torosların bazı temel jeoloji özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 1976; 19, 65-78.
- [19] Kaya A, Keban (Elazığ) civarındaki metamorfiteğin yapısal analizi ve tektonik evrimi. Doktora Tezi. FÜ Fen Bil Enst, 133s.(yayımlanmamış), 2001.
- [20] Akgül B, Piran köyü (Keban) çevresindeki magmatik kayaların petrografik ve petrolojik özellikleri. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 125s. (yayımlanmamış), 1993.
- [21] MTA, 1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 2002.
- [22] Perincek D, Palu-Karabegân-Elazığ-Sivrice-Malatya alanının jeolojisi ve petrol imkânları. TPAO Rap No 1361, 1979a.
- [23] Turan M, Aksoy E, Bingöl AF, Doğu Torosların jeodinamik evriminin Elazığ civarındaki özellikleri. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimlerinin 25. Yılı Sempozyumu Bildiriler, 15-18 Kasım, 1993.
- [24] Kürüm S, K-Ar age, geochemical, and Sr-Pb Isotopic compositions of Keban magmatics, Elazığ, Eastern Anatolia, Turkey. *Natural Science*, 2011; 3/9, 750-767.
- [25] Kürüm S, Akgül B, Öztüfekçi-Önal A, Boztuğ D, Harlavan Y, Ural M, An Example for Arc-Type Granitoids along Collision Zones: The Pertek Granitoid, Taurus Orogenic Belt, Turkey. *International Journal of Geoscience*, 2011, 2, 214-226.
- [26] Lin YC, Chung SL, Bingöl AF, Beyarslan M, Petrogenesis of late Cretaceous Elazığ magmatic rocks from SE Turkey: New age and geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Goldschmidt Conference*, 2015.
- [27] Lin YC, Chung SL, Bingöl AF, Beyarslan M, Li XH, Yang JH, Lee HY, Short-lived late Cretaceous arc magmatism in SE Turkey: Temporal geochemical variations and tectonic implications, *Goldschmidt Conference*, 2016.
- [28] Sar A, Pertek (Tunceli) güneydoğusundaki granitoidlerin petrolojisi. Yüksek Lisans Tezi. FÜ Fen Bil Enst, 84s, 2016.
- [29] Beyarslan M, Bingöl AF, Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin and tectonic implications of late cretaceous intra-oceanic arc magmatics in the Southeast Anatolian Orogenic Belt (SE-Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 2018; 147, 477-497.
- [30] Ural M, Arslan M, Göncüoğlu MC, Tekin UK, Kürüm S, Late Cretaceous arc and back-arc formation within the southern Neotethys: whole-rock, trace element and Sr-Nd-Pb isotopic data from basaltic rocks of the Yüksekova complex (Malatya-Elazığ, SE Turkey). *Ofioliti*, 2015; 40(1), 57-72.
- [31] Aksoy E, Türkmen İ, Turan M, Meriç E, Harami Formasyonu'nun (Üst Kampaniyen-Maastrichtiyen) stratigrafik konumu ve çökelme ortamı ile ilgili yeni bulgular, *Elazığ Güneyi, Türkiye Petrol Jeolog D Bül*, 1999; 11(1), 1-15.
- [32] Kürüm S, Özbulut E, Ural M, Polijenetik bir volkanizma ve petrografik-jeokimyasal özellikleri: Harput (Elazığ) Karataş Tepe volkanizması. *Yerbilimleri/Geosound*, 2007; 50-51, 47-64.
- [33] Kürüm S, Tanyıldızı Ö, Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Upper Cretaceous (calc-alkaline) and Miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey. *J of African Earth Sciences*, 2017; 134, 332-344.
- [34] Deer WA, Howie RA, Zussman J, An introduction to the rock forming minerals (second): London, Longman, 1992; 696 pp.
- [35] Morimoto N, Fabrice J, Ferguson A, Ginzburg IV, Ross M, Seifert FA, Zussman J, Akoi KI, Gottardi G, Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 1988; 52, 535-555.
- [36] Nekvasil H, Dondolini A, Horn J, Filiberto J, Long H, Lindsley DH, The origin and evolution of silica-saturated alkalic suites: an experimental study. *Journal of Petrology*, 2004; 45, 693-721.
- [37] Aoki KI, Shiba I, Pyroxenes from Iherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan, *Lithos*, 1973; 6, 41-51.
- [38] Leterrier J, Maury RC, Thonon P, Girard D, Marchal M, Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982; 59, 139-154.
- [39] Leake BE, On aluminous and edenitic amphiboles. *Mineralogical Magazine*, 1971; 38, 389-407.

- [40] Leake EB, Wooley AR, Arps CES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD, vd, Nomenclature of Amphiboles Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Comission on New Minerals and Mineral Names. European Journal of Mineralogy, 1997; 9, 623- 651.
- [41] Jiang CY, An SY, On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance. J Mineral Petrol, 1984; 3, 1-9.
- [42] Coltorti M, Bonadiman C, Faccini B, Gre goire M, O'reilly SY, Powell W, Amphibole from suprasubduction and intra-plate litospheric mantle. Lithos, 2007; 99(1), 68-84.





## Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

### Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayımlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

**Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor:** (Sorumlu yazar/Corresponding author\*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1 .....

2 .....

3 .....

4 .....

5 .....

**NOT:** Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.